



## Prioritätsbescheinigung über die Einreichung einer Patentanmeldung

**Aktenzeichen:** 102 36 377.3  
**Anmeldetag:** 02. August 2002  
**Anmelder/Inhaber:** Dr. Johannes Heidenhain GmbH, Traunreut/DE  
**Bezeichnung:** Verfahren zur Fehlererkennung bei einer  
Antriebseinrichtung  
**IPC:** H 02 P, H 02 M, G 01 R

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ursprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.

München, den 08. Mai 2003  
**Deutsches Patent- und Markenamt**  
**Der Präsident**  
Im Auftrag

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Wehner', is written over the printed name.

**Wehner**

Dr. Johannes Heidenhain GmbH  
Dr.-Johannes-Heidenhain-Straße 5

83301 Traunreut

JH153

---

Verfahren zur Fehlererkennung bei einer Antriebseinrichtung

---

**Beschreibung**

- 5 Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Fehlererkennung bei einer Antriebseinrichtung nach dem Gattungsbegriff des Patentanspruchs 1.

Ein derartiges Verfahren ist vorgesehen zur Fehlererkennung bei einer Antriebseinrichtung mit einem Mehrphasen-Elektromotor, insbesondere Drehstrommotor, und einem  
10 dem Elektromotor vorgeschalteten Leistungsteil in Form eines Stromrichters (Umrichters), wobei der Stromrichter die Spannung an den Phasen des Elektromotors steuert und die (von den besagten Spannungen abhängigen) Phasenströme in den einzelnen Phasen des Elektromotors jeweils periodisch verlaufen. Die Phasenströme werden dabei zur Fehlererkennung gemessen.

15

Verfahren zur Fehlererkennung bei einer Antriebseinrichtung unter Messung von Phasenströmen sind beispielsweise aus der US-PS 5,266,891 und der EP 0 848 492 A1 bekannt.

Der Erfindung liegt das Problem zu Grunde, ein verbessertes Verfahren zur Fehlererkennung bei einer Antriebseinrichtung zur Verfügung zu stellen.

5 Dieses Problem wird erfindungsgemäß durch ein Verfahren mit den Merkmalen des Patentanspruchs 1 gelöst.

10 Danach werden zur Fehlererkennung die Phasenströme an einem vorgegebenen Punkt der jeweiligen Periode, das heißt bei einem vorgegebenen Stromwinkel, unter gleichzeitiger Variation der Spannungen an den Phasen des Elektromotors gemessen und die Messwerte in Abhängigkeit von der Spannung an der jeweiligen Phase des Elektromotors ausgewertet.

15 Die erfindungsgemäße Lösung eignet sich für die Fehlererkennung in Antriebseinrichtungen für Werkzeugmaschinen und ermöglicht eine Lokalisierung von Fehlern, so dass insbesondere zwischen einem Fehler im Stromrichter und einem Fehler im nachgeschalteten Elektromotor ohne Verwendung separater Messeinrichtungen für den Stromrichter einerseits und dem Elektromotor andererseits unterschieden werden kann. Dies ermöglicht darüber hinaus eine Ferndiagnose von Fehlern mittels eines Modems oder über Internet.

20

Die Möglichkeit der Unterscheidung zwischen Fehlern im Stromrichter einerseits und im Elektromotor andererseits ergibt sich daraus, dass zur Fehlererkennung nicht einfach die Phasenströme in den einzelnen Phasen des Elektromotors bei bestimmten Stromwinkeln gemessen werden, sondern dass hierbei gleichzeitig eine Variation der die Ströme erzeugenden elektrischen Spannungen stattfindet. Das Verhalten der Ströme in Abhängigkeit von der zu Grunde liegenden elektrischen Spannung ermöglicht eine Auswertung, die zu einer Unterscheidung zwischen Fehlern im Stromrichter einerseits und im Elektromotor andererseits führt. Dies wird weiter unten anhand von Beispielen im Einzelnen dargelegt werden. Wichtig ist hierbei, dass die Spannungen während der Messung der Phasenströme derart variiert werden, dass sich der Stromwinkel nicht ändert, also die Phasenströme während einer Messung jeweils an einem einzigen, konstanten Punkt der Periode untersucht werden.

25

30

Bei den zu detektierenden Fehlern des Elektromotors handelt es sich insbesondere um eine Unterbrechung in den Leitungen einer Phase des Elektromotors, z. B. als Folge eines Leitungsbruches oder eines nicht geschlossenen Kontaktes. Bei den innerhalb d s  
5 Stromrichters zu detektierenden Fehlern kann es sich vor allem um ein fehlerhaftes, das heißt nicht korrekt schaltendes Stromrichterventil in Form eines Transistors, insbesond - re eines sogenannten IGBT (Insulated-Gate-Bipolar-Transistor), handeln.

10 Eine Unterbrechung in einer Phase des Elektromotors wird dadurch erkannt, dass der entsprechende Phasenstrom unabhängig von dem Wert der zu Grunde liegenden elektrischen Spannung stets annähernd gleich null ist. (Der exakte Wert „0“ tritt aufgrund von Messeinflüssen in der Regel nicht auf.). Demgegenüber ist bei einem fehlerhaften, nicht korrekt schaltenden Stromrichterventil nur für einen Teilbereich der zugrundeliegenden elektrischen Spannungskurve ein (bei einem korrekt schaltenden Stromrichterventil nicht  
15 auftretender) Abfall auf den Stromwert null zu beobachten.

Zur Auswertung der Phasenströme wird ein solcher Stromwinkel gewählt, dass mindestens einer der Phasenströme während der Messung stets gleich Null ist. Bei sinusförmig verlaufenden Phasenströmen kann die Messung der Phasenströme beispielsweise bei  
20 einem Stromwinkel erfolgen, an dem einer der Phasenströme einen Nulldurchgang aufweist.

Die Spannungen werden während der Messungen der Phasenströme vorzugsweise derart variiert, dass das Verhältnis der Spannungen während der Messung konstant bleibt.  
25 Insbesondere können zwei der Spannungen so variiert werden, dass die Summe der Spannungen während der Messung stets gleich null ist. In einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung werden die Spannungen an den einzelnen Phasen des Elektromotors während der Messung jeweils periodisch variiert, wobei die Spannungen während einer Messung jeweils eine volle Periode durchlaufen.

30

Die Variation der Spannungen kann in einfacher Weise auf der Basis einer Sinus-Kurve erfolgen, so dass die Spannungen Nulldurchgänge erweisen, die für die konkrete Aus-

wertung der gemessenen Phasenströme von Bedeutung sind, wie weiter unten erläutert werden wird.

5 Die Messung der Phasenströme kann bei mehreren unterschiedlichen Stromwinkeln erfolgen, wobei die Anzahl der Messungen bei unterschiedlichen Stromwinkeln vorzugsweise der Anzahl der Phasen des Elektromotors entspricht und bei jeder der Messungen ein anderer der Phasenströme den Wert null aufweist.

10 Zur Auswertung der Messergebnisse im Hinblick auf die Fehlererkennung können die gemessenen Phasenströme jeweils an definierten, anhand des Verlaufs zu Grund liegenden elektrischen Spannungen bestimmbaren Punkten des jeweiligen Stromverlaufs ausgewertet werden, beispielsweise am Maximum des jeweiligen Phasenstromes zwischen einem Maximum und einem Nulldurchgang der zugehörigen Spannung. Die Auswertung der Messergebnisse kann dann in einfacher Weise in tabellarischer Form erfolgen.  
15

Es ist nicht erforderlich, sämtliche Phasenströme direkt zu messen, da einer der Phasenströme indirekt aus den übrigen Phasenströmen ermittelt werden kann.

20 Die Eingangssignale des Stromrichters werden durch Ausgangssignale eines Reglers, insbesondere durch pulsweitenmodulierte Signale (PWM-Signale), bestimmt. Daher ist es zweckmäßig, die Ausgangssignale des Reglers an der Schnittstelle zwischen Regler und Stromrichter im Hinblick auf Fehler zu untersuchen. Hierbei wird überprüft, ob bestimmte, vorgegebene Muster der Ausgangssignale des Reglers die zu erwartenden Eingangssignale (Spannungssignale) am Stromrichter erzeugen. Ein Fehler liegt dann vor,  
25 wenn bestimmte vorgegebene Ausgangssignale des Reglers nicht zu der erwarteten Spannungssignalen führen. Zur Auswertung der Spannungssignale werden diese über ein logisches Gatter, insbesondere EXOR-Gatter miteinander verknüpft.

30 Weiterhin kann im Rahmen der vorliegenden Erfindung ergänzend geprüft werden, ob ein Kurzschluss zwischen zwei Phasen des Elektromotors vorliegt. Die Prüfung auf Kurzschluss erfolgt immer dann, wenn die Messung der Phasenströme auf Grund eines Über-

stromes in einem der Stromrichterventile des Stromrichters abgebrochen werden musste. Die Detektion eines solchen Überstromes kann in einfacher Weise in dem jeweiligen Stromrichterventil selbst erfolgen, das als Folge des Überstromes abschaltet.

5 Zur Prüfung auf Kurzschluss werden jeweils zwei Phasen des Elektromotors auf das gleiche elektrische Potenzial gelegt und es wird sodann geprüft, ob die Größe eines der Phasenströme auf einen Kurzschluss hinweist. Die Festlegung des elektrischen Potentials der einzelnen Phasen kann dabei durch geeignete Wahl eines Stromwinkels erfolgen. Indem nacheinander alle möglichen Kombinationen zweier Phasen des Elektromotors auf  
10 das gleiche elektrische Potenzial gelegt werden, lässt sich bei Auftreten von Kurzschlussströmen ermitteln, welche der beiden Phasen kurzgeschlossen sind. Denn der Kurzschluss kann jeweils nicht von den Phasen herrühren, die sich auf dem gleichen elektrischen Potenzial befinden.

15 Sollten bei allen Kombinationen Kurzschlussströme auftreten, so kann anschließend eine Prüfung auf einen Erdschluss einer Phase durchgeführt werden. Hierzu werden die einzelnen elektrischen Schaltungen des Stromrichters, die jeweils einer der Phasen des Elektromotors zugeordnet sind, mit identischen Eingangssignalen beaufschlagt. Diese elektrischen Schaltungen können jeweils durch paarweise angeordnete Transistoren oder  
20 Thyristoren, insbesondere in Form paarweise angeordneter IGBTs, mit zugeordneten Freilaufdioden gebildet werden.

Durch die den einzelnen Phasen des Elektromotors zugeordneten elektrischen Schaltungen wird in Abhängigkeit von dem jeweiligen Eingangssignal des Stromrichters jeweils  
25 eine von zwei möglichen Spannungen als elektrisches Potential an die entsprechende Phase des Elektromotors angelegt. Ein Erdschluss liegt in diesem Fall dann vor, wenn ein Strom auftritt, obwohl alle Phasen des Elektromotors auf ein identisches elektrisches Potenzial gelegt worden sind.

30 Die erfindungsgemäße Lösung und ihre vorstehend beschriebenen Weiterbildungen sind insbesondere geeignet zur Verwendung bei einem Drei-Phasen-Drehstrom-Motor.

Weitere Merkmale und Vorteile der Erfindung werden bei der nachfolgenden Beschreibung der Figuren deutlich werden.

Es zeigen:

5

Figur 1 ein schematisches elektrisches Schaltbild eines Elektromotors mit einem vorgeschalteten Frequenz-Umrichter;

Figur 2 ein Flussdiagramm eines Verfahrens zur Fehlererkennung bei einer Antriebseinrichtung gemäß Figur 1;

Figur 3 eine schematische Darstellung einer Auswerteschaltung zur Ermittlung von Fehlern an der Schnittstelle zwischen dem Frequenz-Umrichter aus Figur 1 und einem vorgeschalteten Regler;

15

Figur 4 eine Tabelle zur Auswertung der Schaltung gemäß Figur 3;

Figur 5 ein Flussdiagramm zur näheren Erläuterung eines Verfahrensschrittes aus Figur 2 betreffend die Unterscheidung von Fehlern in dem Elektromotor einerseits und dem vorgeschalteten Frequenz-Umrichter andererseits;

20

Figur 6 eine Darstellung des idealen Verlaufs der Phasenströme in dem Elektromotor aus Figur 1;

25

Figuren 7a

bis 16c unterschiedliche relevante Messergebnisse bei Durchführung des Verfahrens gemäß Figur 5;

30

Figur 17 eine tabellarische Darstellung der Ergebnisse eines Verfahrens zur Erkennung eines Kurzschlusses zwischen zwei Phasen des Elektromotors aus Fig. 1;

Figur 18 ein Flussdiagramm zur Erkennung eines Erdschlusses in einer der Phasen des Elektromotors aus Figur 1.

In Figur 1 ist eine Antriebseinrichtung für Werkzeugmaschinen dargestellt, die einen Mehrphasen-Elektromotor in Form eines Dreiphasen-Drehstrom-Motors 1, einen dem Motor 1 vorgeschalteten Stromrichter in Form eines Frequenz-Umrichters 2 sowie einen Regler 3 zur Erzeugung von PWM-Signalen für den Umrichter 2 aufweist. Die drei Phasen 11, 12, 13 des Antriebsmotors 1 sind in Figur 1 schematisch als Spulen mit einer zugeordneten Zuleitung dargestellt.

Der dem Antriebsmotor 1 vorgeschaltete Umrichter 2 (Leistungsteil) wird gebildet durch eine Paarung von IGBTs mit zugehörigen Freilaufdioden. Ferner ist jedem IGBT 26a, 26b; 27a, 27b; 28a, 28b eine elektrische Zuleitung 21a, 21b; 22a, 22b bzw. 23a, 23b zugeordnet.

15

Jedes dieser Paare 26a, 26b; 27a, 27b; 28a, 28b von IGBTs bildet zusammen mit den zugehörigen Freilaufdioden und den Zuleitungen 21a, 21b; 22a, 22b; 23a, 23b eine elektrische Schaltung 21, 22 bzw. 23, die in Abhängigkeit von den Eingangssignalen des Umrichters 2 bzw. den Ausgangssignalen des Reglers 3 eine obere Zwischenkreisspannung  $U_z/2$  oder eine untere Zwischenkreisspannung  $-U_z/2$  an die jeweils zugeordnete Phase 11, 12 oder 13 des Antriebsmotors 1 schaltet. Zwei der hieraus resultierenden Phasenströme  $I_1$ ,  $I_2$  in der ersten Phase 11 bzw. der zweiten Phase 12 des Antriebsmotors 1 werden mittels Stromsensoren 41, 42 gemessen. Der Phasenstrom  $I_3$  in der dritten Phase 13 des Antriebsmotors 1 lässt sich aus den gemessenen Werten der beiden anderen Phasenströme  $I_1$ ,  $I_2$  ermitteln. Ein Strom kann dabei innerhalb des Antriebsmotors nur dann fließen, wenn mindestens zwei der drei Spannungen  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$  an den Phasen 11, 12, 13 des Elektromotors 1 unterschiedlich sind, also mindestens eine der Spannungen  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$  auf den Wert  $U_z/2$  und eine andere auf den Wert  $-U_z/2$  gelegt worden ist.

30



Von dem Regler 3, dessen Ausgangssignale PWM1, PWM2 und PWM3 die Eingangssignale des Umrichters 2 bestimmen, sind in Figur 3 lediglich elektrische Leitungen 31, 32, 33 dargestellt, die die Schnittstelle zu dem Umrichter 2 bilden und die jeweils einer der elektrischen Schaltungen 21, 22, 23 des Umrichters 2 zugeordnet sind. Bei den vom  
5 Regler 3 erzeugten Ausgangssignalen handelt es sich jeweils um Rechtecksignale, deren Tastverhältnis abhängig von dem gewünschten Strom-Sollwerten im Antriebsmotor 1 ist.

Antriebseinrichtungen für Werkzeugmaschinen der in Figur 1 dargestellten Art sind bekannt. Nachfolgend wird anhand der weiteren Figuren beschrieben werden, wie bei einer  
10 solchen Antriebseinrichtung eine Fehlererkennung durchgeführt werden kann, die nicht nur eine zuverlässige Erkennung auftretender Fehler, sondern auch deren Lokalisierung ermöglicht. Insbesondere soll zwischen dem Auftreten eines Fehlers im Antriebsmotor 1 und im Umrichter 2 unterschieden werden können, ohne hierfür zusätzliche Messeinrichtungen, insbesondere separate Messeinrichtungen zur Erkennung von Fehlern im An-  
15 triebsmotor 1 einerseits und im Umrichter 2 andererseits, vorzusehen.

Figur 2 zeigt in einem Flussdiagramm eine Übersicht über den Gesamtablauf eines Fehlertestes 100 für die Antriebseinrichtung aus Figur 1.

20 In einem ersten Testschritt 101 wird die Schnittstelle zwischen dem Regler 3 und dem Umrichter 2 geprüft, d. h. es wird getestet, ob die durch den Regler 3 erzeugten PWM-Signale korrekt im Umrichter 2 ankommen und ob alle benötigten Hilfsspannungen zur Ansteuerung der IGBTs vorliegen. Wird bei diesem Test ein Fehler festgestellt, so wird die Fehlermeldung 102 „PWM-Schnittstelle fehlerhaft“ erzeugt und der Test beendet.  
25 Denn weitere Testfunktionen sind nicht sinnvoll ausführbar, solange nicht sichergestellt ist, dass dem Umrichter 2 korrekte Eingangssignale zugeführt werden.

Wenn bei dem Test der Schnittstelle zwischen Umrichter 2 und Regler 3 keine Fehler auftraten, dann wird im nächsten Schritt 103 ein „Motortest mit Strommessung“ durchge-  
30 führt. Hierbei werden für drei unterschiedliche Stromwinkel des den Antriebsmotor 3 antreibenden Drehstromes die zugrunde liegenden elektrischen Spannungen sinusförmig variiert. Der Stromwinkel wird dabei derart gewählt, dass in einer der drei Motorphasen

der Strom gleich Null ist, die zugehörige Spannung also ebenfalls konstant den Wert Null aufweist.

5 Durch eine getrennte Auswertung der beiden Halbwellen der sinusförmig verlaufenden Spannungen ergeben sich bei drei unterschiedlichen Stromwinkeln insgesamt sechs auswertbare Messungen der Phasenströme. Die Auswertung erfolgt mittels einer Tabelle, anhand deren Einträgen sich feststellen lässt, ob ein Fehler in der Antriebseinrichtung auf einen nicht einschaltenden IGBT oder eine Unterbrechung in einer Phase des Antriebsmotors zurückgeht. Hierbei wird der Effekt ausgenutzt, dass der jeweils induzierte  
10 Phasenstrom je nach Vorzeichen über die zugehörige Freilaufdiode zur positiven oder negativen Zwischenkreis-Spannungsschiene in der entsprechenden elektrischen Schaltung 21, 22, 23 des Umrichters 2 abfließt.

15 Während dieses Testes wird gleichzeitig auch abgefragt, ob einer der IGBTs des Umrichters 2 wegen Überstromes abschaltet. Wird kein IGBT-Error 104 in Form eines Überstromes festgestellt, so erfolgt die Auswertung 103a der Messwerte aus den Strommessungen 103 und es wird gegebenenfalls eine Fehlermeldung 105 ausgegeben, die auf eine offene Phase in dem Antriebsmotor 1 oder einen Fehler in dem Umrichter 2 (nicht einschaltender IGBT) hinweist.

20

Wird demgegenüber in einem der IGBTs ein Überstrom festgestellt, so wird in einem nächsten Schritt 106 überprüft, ob ein Phasen-Kurzschluss vorliegt, d.h., ob zwei Phasen des Antriebsmotors 1 kurzgeschlossen sind. Hierzu werden wiederum Messungen bei drei unterschiedlichen Stromwinkeln durchgeführt, wobei die Stromwinkel der einzelnen  
25 Messungen so gewählt werden, dass jeweils zwei der Phasen auf dem gleichen elektrischen Potential liegen, also auf die gleiche Zwischenkreis-Spannung geschaltet worden sind. Bei der Auswertung der Messungen wird berücksichtigt, dass bei Vorliegen eines Kurzschlusses zweier Phasen während der Strommessung nur dann keine Abschaltung wegen eines Überstromes stattfindet, wenn gerade zwischen den beiden betroffenen  
30 Phasen keine Potentialdifferenz vorliegt, also die beiden Phasen auf die gleiche Zwischenkreisspannung geschaltet worden sind. Nach Erkennen eines Kurzschlusses wird der Test mit der Fehlermeldung 107 „Phasenkurzschluss“ beendet.

Findet bei allen drei Stromwinkeln eine Abschaltung wegen eines Überstromes statt, so wird ein Test 108 auf Erdschluss durchgeführt. Dabei werden die Ausgangssignale (PWM-Signale) des Reglers 3 zunächst fest auf „1“ und dann fest auf „0“ eingestellt.

- 5 Falls ein Erdschluss vorliegt, so wird bei beiden Messungen eine Abschaltung wegen eines auftretenden Überstromes erfolgen. Bei einem Kurzschluss innerhalb eines IGBT wird demgegenüber ein Überstrom nur dann auftreten, wenn der dem defekten IGBT als Partner zugeordnete weitere IGBT eingeschaltet worden ist. Hierdurch kann also unterschieden werden, ob ein Überstrom auf einen Erdschluss einer der Phasen des Antriebsmotors 1 oder auf einen Kurzschluss innerhalb eines IGBT des Umrichters 2 zurückgeht. Durch Beobachtung und Auswertung der gemessenen Ströme kann dabei auch ein hochohmiger Erdschluss bzw. Kurzschluss erkannt werden.

Im Folgenden werden die anhand Figur 2 im Zusammenhang dargestellten Fehlertests  
15 einzeln näher erläutert werden.

Figur 3 zeigt eine Auswerteschaltung zur Durchführung und Auswertung des Testes 101 (Figur 2) auf Fehler an der Schnittstelle zwischen Regler 3 und Umrichter 2. Die Auswerteschaltung umfasst drei Anschlüsse, die jeweils einer der drei Zuleitungen 31, 32, 33 (Figur 1) an der Schnittstelle von Regler 3 und Umrichter 2 zugeordnet sind. Die ersten beiden Anschlüsse sind über jeweils eine elektrische Leitung 51, 52 mit den beiden Eingängen eines logischen Gatters 56 in Form eines EXOR-Gatters verbunden. Das Ausgangssignal dieses ersten EXOR-Gatters 56 wird einem zweiten EXOR-Gatter 57 zugeführt, dessen Eingang außerdem das an dem dritten Anschluss der Auswerteschaltung auftretende Signal über eine Leitung 53 zugeführt ist. Das zweite EXOR-Gatter 57 ist wiederum ausgangsseitig mit einem Eingang eines dritten EXOR-Gatters 58 verbunden, dem außerdem das Ergebnis einer Selbsttest-Schaltung 54 zugeführt wird, die das Vorhandensein aller zum Ansteuern der IGBTs benötigten Kleinspannungen (in Höhe von 15V bzw. 24V) prüft. Das Ausgangssignal des dritten EXOR-Gatters 58 wird einem logischen Gatter 59 in Form eines NOR-Gatters zugeführt, das eingangsseitig außerdem mit einer Schaltung 55 zum Aktivieren des Tests der Schnittstelle verbunden ist.

Zur Durchführung des Fehlertests an der Schnittstelle zwischen Regler 3 und Umrichter 2 wird der Regler derart betätigt, dass definierte Muster an PWM-Signalen an den die Schnittstelle bildenden Leitungen 31, 32, 33 zu erwarten sind. Jedes dieser Muster entspricht einer bestimmten Verteilung der Werte „1“ und „0“ für die PWM-Signale PWM1, PWM2 und PWM3, die von dem Regler 3 in den entsprechenden Leitungen 31, 32, 33 der Schnittstelle zur Verfügung gestellt werden sollen. Die aufgrund dieser Signale in den eingangsseitigen Leitungen 51, 52, 53 der Auswerteschaltung 5 erzeugten Spannungssignale PWM.U1, PWM.U2, PWM.U3, die jeweils den entsprechenden Wert „1“ bzw. „0“ des zugehörigen PWM-Signales repräsentieren, werden in den ersten beiden EXOR-Gattern 56, 57 miteinander verknüpft. Dazu kommt noch die Verknüpfung mit der Selbsttest-Schaltung 54, die das Vorhandensein aller erforderlichen Kleinspannungen überprüft und im Fehlerfall den Wert „1“ und im Übrigen den Wert „0“ an den entsprechenden Eingang des dritten EXOR-Gatters 58 legt. Das Ergebnis dieser drei Verknüpfungen in den EXOR-Gattern 56, 57, 58 wird dem NOR-Gatter 59 (Invertierer) zugeführt, das bei Aktivierung der Test-Schaltung außerdem von den Steuerleitungen zur Testaktivierung eingangsseitig mit dem Wert „0“ beaufschlagt wird, da dann beide Steuerleitungen SH1, SH2 jeweils auf den Wert „0“ gelegt sind.

Zur Auswertung der mittels der Auswerteschaltung 5 gemessenen Werte werden die Muster der drei PWM-Signale PWM1, PWM2, PWM3 sowie das in Abhängigkeit von dem jeweiligen Muster gemessene Ausgangssignal des NOR-Gatters 59 in einer Tabelle abgelegt.

In Figur 4 ist tabellarisch für alle acht möglichen Muster der drei PWM-Signale, von „000“ bis „110“, jeweils angegeben, welche Werte („Test.Out“) ausgangsseitig an dem NOR-Gatter 59 auftreten können und welche Schlüsse hieraus gezogen werden können.

Die ersten drei Zeilen der Tabelle aus Figur 4 geben die möglichen Kombinationen (Muster) der drei PWM-Signale PWM1, PWM2, PWM3 an, in Abhängigkeit von denen das Ausgangssignal („Test Out“) am NOR-Gatter 59 erzeugt wird. Die acht Spalten der Tabelle beziehen sich dabei auf die acht unterschiedlichen möglichen Kombinationen der drei PWM-Signale.

Die nächsten acht Zeilen der Tabelle, unter der Überschrift „Kleinspannungen OK“ geben die möglichen Ausgangssignale („Test.Out“) für alle acht Kombinationen an PWM-Signalen in dem Fall an, in dem kein Kleinspannungsfehler vorliegt. Die erste dieser acht  
5 Zeilen repräsentiert den Fall, dass kein Fehler an der Schnittstelle zwischen Regler 3 und Umrichter 2 zu beobachten ist. In diesem Fall wird bei der Signalkombination „000“ an den Eingängen der Auswerteschaltung am Ausgang des NOR-Gatters 59 der Wert „1“ auftreten; bei der eingangsseitigen Signalkombination „100“ tritt ausgangsseitig der Wert „0“ auf; usw.

10 Die nächsten sieben Zeilen stellen jeweils Ergebnisse dar, bei denen das an der Schnittstelle auftretende Signal nicht dem aufgrund der Einstellung des Reglers erwarteten Signal entspricht. Die entsprechenden Fehler, die sich jeweils durch Auswertung der acht möglichen Kombinationen der gewünschten PWM-Signale sowie des zugehörigen Ausgangssignales („Test.Out) am Invertierer 59 ergeben, sind jeweils am Ende der Tabelle  
15 angedeutet.

Die nächsten acht Zeilen der Tabelle befassen sich mit dem Fall, dass beim Selbsttest der Kleinspannungen ein Fehler aufgetreten ist und dementsprechend an dem dritten  
20 EXOR-Gatter 58 durch die entsprechende Schaltung 54 eingangsseitig der Wert „1“ angelegt wird.

Die Fehlermeldung „PWM.U1 hängt auf 0“ weist beispielsweise darauf hin, dass in der entsprechenden Zuleitung 51 das durch eine Spannung repräsentierte Signal PWM.U1  
25 stets den Wert „0“ annimmt, obwohl in Abhängigkeit von dem jeweiligen Muster der drei PWM-Signale dieser Wert zwischen „0“ und „1“ pendeln sollte. Dieser Fehler kann beispielsweise auf einen Leitungsbruch zurückzuführen sein. Die Charakterisierung „PWM.U1=PWM.U2“ weist darauf hin, dass in den beiden entsprechenden Leitungen 51, 52 der Auswerteschaltung 5 stets dasselbe Signal gemessen wird, obwohl dies lediglich  
30 bei vier der insgesamt acht möglichen Kombinationen der PWM-Signale der Fall sein dürfte.

Die letzten beiden Zeilen der Tabelle weisen auf „generelle Fehler“ der Auswerteschaltung hin. Im ersten Fall ist die Testschaltung gar nicht aktiviert; der Fehler liegt also in den entsprechenden Steuerleitungen SH1, SH2. Im zweiten Fall ist der Ausgang der Testschaltung („Test.Out“) offen.

5

Nach Abschluss der anhand der Figuren 3 und 4 beschriebenen Überprüfung der an der Schnittstelle zwischen Regler 3 und Umrichter 2 anliegenden Signale erfolgt das eigentliche Kernstück der Fehlerdiagnose, nämlich die Ermittlung von Fehlern in dem Umrichter 2 oder dem Antriebsmotor 1 durch Messung der Phasenströme I1, I2, I3 in den einzelnen Phasen 11, 12, 13 des Antriebsmotors 1. Eine Übersicht über den Ablauf der entsprechenden Messungen ist in dem Flussdiagramm gemäß Figur 5 gezeigt.

10

Ziel dieses Testes ist es, nicht nur das Vorliegen eines Fehlers festzustellen, sondern den Ursprung des Fehlers zu lokalisieren, insbesondere zwischen einer Unterbrechung einer Phase des Antriebsmotors 1, z.B. infolge eines Leitungsbruchs (auch einer Wicklungsunterbrechung im Motor) oder eines offenen Kontaktes, und einem Fehler in dem Umrichter 2, z.B. als Folge eines nicht einschaltenden IGBT, zu unterscheiden.

15

Nach Aktivierung der Strommessung 200 werden zunächst die zugrundezulegenden Mess-Spannungen ermittelt. Hierzu wird aus den elektrischen Daten des Motors, die von der Motorsteuerung abgefragt werden können, diejenige Spannung ermittelt, die im Motor den für die Messung gewünschten Nennstrom induziert. Der tatsächlich induzierte Strom wird später während der Messung nochmals überprüft. Falls die Differenz zu dem gewünschten Nennstrom einen vorgegebenen Wert überschreitet, wird die Mess-Spannung angepasst, so dass im Antriebsmotor 1 für eine erneute Messung der zulässige Maximalstrom des Motors induziert wird. Für diese Anpassung der Spannung wird von einem linearen Zusammenhang zwischen Strom und Spannung ausgegangen. Stehen die elektrischen Daten des Motors nicht zur Verfügung, so besteht alternativ die Möglichkeit, sich von einer zunächst niedrig gewählten Spannung an den Nennstrom heranzutasten. Die Messspannung wird derart gewählt, dass sich die induzierten Phasenströme in dem Antriebsmotor 1 einerseits hinreichend deutlich vom Hintergrundrau-

20

25

30

schen abheben und dass andererseits eine Beschädigung des Antriebsmotors 1 durch zu große Ströme ausgeschlossen ist.

5 Nach Festlegung der Mess-Spannung erfolgt in einem nächsten Schritt 202 bei einem ersten Stromwinkel, bei dem einer der Phasenströme  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  gleich null ist, eine Messung der beiden übrigen Phasenströme in Abhängigkeit von einer sinusartigen Variation der Mess-Spannung, und zwar derart, dass die Spannung genau eine Periode durchläuft.

10 Im Anschluss daran wird überprüft, ob bei der Messung ein IGBT-Error 203 aufgetreten ist, d.h. ob einer der IGBTs des Umrichters 2 wegen eines Überstromes abgeschaltet worden ist. In diesem Fall wird die Messung mit einer entsprechenden Fehlermeldung beendet.

15 Andernfalls wird die Strommessung weitergeführt, und zwar bei zwei weiteren Stromwinkeln des zur Bestromung des Antriebsmotors 1 dienenden Drehstromes, so dass die Messung bei insgesamt drei Stromwinkeln durchgeführt wird und bei jeder Messung ein anderer der Phasenströme  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  den Wert 0 aufweist. Ferner wird nach jeder der weiteren Strommessungen 204, 206 das Vorliegen eines IGBT-Errors 205 bzw. 207 abgefragt und wiederum die Messung mit einer Fehlermeldung beendet, falls ein solcher vor-  
20 liegt.

25 Ist bei keiner der Strommessungen ein IGBT-Fehler aufgetreten, so wird in einem nächsten Schritt 208 das Maximum des bei der Messung aufgetretenen Strombetrages ermittelt und als  $I_{\text{mess}}$  zur Normierung der Ergebnisse verwendet. Anschließend erfolgen eine Bewertung 209 der Messergebnisse zur Vorbereitung der Fehlererkennung und ein Auswertung 210 der bewerteten Ergebnisse anhand einer Tabelle.

30 Nachfolgend wird nun die Durchführung der einzelnen Strommessungen, die Bewertung der Messergebnisse sowie die Auswertung der Ergebnisse zur Fehlererkennung genauer beschrieben werden. Die Auswertung wird nur dann vorgenommen, wenn nicht während der Strommessung einer der IGBTs wegen eines Überstromes abgeschaltet und die Messung insgesamt unterbrochen worden ist. Denn in diesem Fall würde, wie oben an-

hand an Figur 2 dargelegt, anstelle einer Auswertung der Strommessung eine Prüfung auf Phasenschluss bzw. Erdschluss erfolgen.

- 5     Figur 6 zeigt den idealen Verlauf der drei Phasenströme I1, I2, I3, des Antriebsmotors 1 in einem Winkelbereich zwischen 0° und 500°. Die drei Phasenströme I1, I2, I3 verlaufen jeweils sinusförmig und sind um 120° gegeneinander phasenverschoben. Der Verlauf der Phasenströme wird bestimmt durch die PWM-Signale, die als Ausgangssignale des Reglers 3 dem Umrichter 2 zugeführt werden und somit das Potential festlegen, auf das  
10     die einzelnen Phasen 11, 12, 13 des Antriebsmotors 1 zu einem jeweiligen Zeitpunkt gelegt werden.

- Vorliegend werden zur Durchführung der Strommessungen, anhand derer Fehler im Umrichter 2 einerseits und im Antriebsmotor 3 andererseits festgestellt werden sollen, die  
15     PWM-Signale PWM1, PWM2 und PWM3 derart eingestellt, dass jeweils einer der drei Phasenströme I1, I2, I3 gleich null ist und die beiden anderen Phasenströme den gleichen Betrag aber entgegengesetztes Vorzeichen aufweisen. Dies ist bei den Stromwinkeln 120°, 240° sowie 360° der Fall, wie aus Figur 6 hervorgeht.

- 20     Anschließend werden bei dem jeweils vorgegebenen Stromwinkel die zugrundeliegenden Spannungen (Potentiale) an den Phasen 11, 12, 13 des Antriebsmotors 1 zeitlich derart variiert, dass die Phasen derjenigen beiden Ströme, die bei dem aktuellen Stromwinkel ungleich null sind, eine volle Sinusperiode durchlaufen und zu jedem Zeitpunkt denselben Betrag aber entgegengesetztes Vorzeichen aufweisen. Die dritte der drei Spannungen U1, U2, U3 ist dabei jeweils gleich null; sie gehört zu demjenigen Phasenstrom, der  
25     bei dem entsprechenden Stromwinkel den Wert null aufweist. Die Amplitude der zeitlich variierten Spannungen ist dabei festgelegt durch die Mess-Spannung, die vor Beginn der Messung wie oben beschrieben ermittelt worden ist.

- 30     In den nachfolgenden Figuren, die Ergebnisse der vorstehend beschriebenen Strommessungen zeigen, sind jeweils lediglich die ersten beiden Phasenströme I1, I2 (soweit ungleich null) und die zugehörigen Spannungen U1, U2 (soweit ungleich null) dargestellt.



Denn nur diesen beiden Phasenströmen I1, I2 ist gemäß Figur 1 jeweils ein Stromsensor 41 bzw. 42 zur Strommessung zugeordnet. Die Verhältnisse in der dritten Phase I3 des Antriebsmotors 1 lassen sich aus den Ergebnissen zu den beiden ersten Phasen I1, I2 errechnen.

5

Die Figuren 7 a bis 7c zeigen die Ergebnisse der Messungen bei den Stromwinkeln 120°, 360° sowie 240°, und zwar bei einer Antriebseinrichtung, bei der weder in dem Umrichter 2 noch in dem Antriebsmotor 1 ein zu detektierender Fehler vorliegt. Es ist deutlich erkennbar, dass die gemessenen Phasenströme I1, I2 jeweils der zugeordneten Spannung U1 bzw. U2 nachlaufen. D.h., die Nulldurchgänge und Maxima der Phasenströme I1, I2 liegen zeitlich jeweils etwas hinter den entsprechenden Nulldurchgängen und Maxima der zugrundeliegenden Spannungen U1, U2.

15

Das Ergebnis der Messung bei einem Stromwinkel von 120° entsprechend Figur 7a zeigt weiterhin, dass die beiden gemessenen Phasenströme I1, I2 entsprechend den zugrundeliegenden Spannungen U1, U2 jeweils eine vollständige Periode durchlaufen.

20

Bei der in Figur 7b dargestellten Messung bei einem Stromwinkel von 360° sind der erste Phasenstrom I1 und die zugehörige Spannung U1 jeweils konstant gleich null, da dieser Phasenstrom I1 bei dem Stromwinkel 360° einen Nulldurchgang besitzt, vgl. Figur 6. Entsprechendes gilt bei der in Figur 7c dargestellten Messung bei einem Stromwinkel von 240° im Hinblick auf den zweiten Phasenstrom I2 und die zugehörige Spannung U2.

25

Die Figuren 8a bis 8c zeigen drei Messungen unter denselben Bedingungen wie anhand der Figuren 7a bis 7c beschrieben, wobei jedoch der obere IGBT 26a der ersten elektrischen Schaltung 21 des Umrichters 2 fehlerhaft ist, also nicht richtig einschaltet. Dies wird deutlich anhand des Verhaltens des ersten Phasenstromes I1 bei einer positiven zugeordneten Spannung U1.

30

Wie weiter oben anhand Figur 1 dargelegt, wird bei einer durch das entsprechende PWM-Signal PWM1, PWM2 bzw. PWM3 erzeugten positiven Spannung (entsprechend dem Wert „1“ des PWM-Signales) jeweils der obere IGBT 26a, 27a, 28a der entspre-

chenden elektrischen Schaltung 21, 22, 23 eingeschaltet. Nimmt das zugeordneten PWM-Signal PWM1, PWM2 bzw. PWM3 demgegenüber den Wert „0“ an und entsteht dementsprechend eine negative Spannung, so wird der jeweilige untere IGBT 26b, 27b, 28b des entsprechenden Paares 26a, 26b; 27a, 27b bzw. 28a, 28b eingeschaltet.

5

Vorliegend weist also die Tatsache, dass gemäß Figuren 8a und 8c bei einem Stromwinkel von  $120^\circ$  sowie  $240^\circ$  der erste Phasenstrom I1 jeweils dann null ist, wenn die zugeordnete Spannung U1 einen positiven Wert annimmt, daraufhin, dass der entsprechende IGBT 26a nicht korrekt eingeschaltet hat. Andernfalls hätte bei einem positiven Wert der genannten Spannung U1 ein entsprechender Wert größer null des ersten Phasenstromes I1 gemessen werden müssen, wie in den Figuren 7a und 7c bei einem fehlerfreien System dargestellt.

10

In entsprechender Weise ist anhand der Figuren 9a bis 9c erkennbar, dass der untere IGBT 26b des ersten Paares 26a, 26b (aus der ersten elektrischen Schaltung 21 des Umrichters 2) defekt ist, also nicht einschaltet. Denn hier nimmt der erste Phasenstrom I1 jeweils dann den Wert null an, wenn die zugehörige Spannung U1 bzw. U2 negativ ist, also der untere IGBT 26b eingeschaltet haben sollte.

15

In entsprechender Weise lässt sich bei den Strom- und Spannungsverläufen in den Figuren 10a bis 10c, 11a bis 11c, 12a bis 12c und 13a bis 13c auf einen fehlerhaften oberen IGBT 27a des zweiten Paares 27a, 27b (Figuren 10a bis 10c), auf einen fehlerhaften unteren IGBT 27b des zweiten Paares 27a, 27b (Figuren 11a bis 11c), auf einen fehlerhaften oberen IGBT 28a des dritten Paares 28a, 28b (Figuren 12a bis 12c) bzw. auf einen fehlerhaften unteren IGBT 28b des dritten Paares 28a, 28b (Figuren 13a bis 13c) schließen.

20

25

Die Figuren 14a bis 14c zeigen demgegenüber jeweils eine Strommessung bei den drei Stromwinkeln  $120^\circ$ ,  $240^\circ$  sowie  $360^\circ$ , entsprechend den Erläuterungen zu den Figuren 7a bis 7c, bei einer Antriebseinrichtung gemäß Figur 1, bei der in der ersten Phase 11 des Antriebsmotors 1 eine Unterbrechung („Phase offen“) vorliegt. Diese kann eine Folge eines Leitungsbruches oder eines nicht ordnungsgemäß geschlossenen Kontaktes sein.

30

Als Folge hiervon ist der Phasenstrom  $I_1$  in der ersten Phase 11 des Antriebsmotors 1 stets gleich null, unabhängig von dem Wert der sinusförmig variierenden zugehörigen Spannung  $U_1$ .

- 5 In entsprechender Weise ergibt eine Auswertung der Messergebnisse gemäß den Figuren 15a bis 15c bzw. gemäß den Figuren 16a bis 16c, dass in der zweiten Phase 12 bzw. der dritten Phase 13 des Antriebsmotors 1 eine Unterbrechung vorliegt, so dass der entsprechende Phasenstrom  $I_2$  stets gleich null ist (Figuren 15a bis 15c) bzw. die ersten und zweiten Phasenströme  $I_1$  und  $I_2$  sich selbst dann zu dem Wert null addieren, wenn  
10 lediglich eine der beiden zugeordneten Spannungen  $U_1$  oder  $U_2$  ungleich null ist, siehe Figuren 16b und 16c.

- Zur konkreten, automatisierten (computergesteuerten) Auswertung der Messergebnisse, wie sie für bestimmte Fehlerfälle beispielhaft anhand der Figuren 7a bis 16c dargestellt  
15 sind, wird die Tatsache ausgenutzt, dass die Phasenströme  $I_1$ ,  $I_2$  den zugeordneten Spannungen  $U_1$  bzw.  $U_2$  hinterherlaufen. So werden zur Auswertung zunächst die Maxima, Minima und Nulldurchgänge der Spannungen  $U_1$  und  $U_2$  bestimmt, die den gemessenen Phasenströmen  $I_1$ ,  $I_2$  zugrunde liegen. Anschließend wird für jedes Spannungs-Maximum und den nachfolgenden Nulldurchgang der entsprechenden Spannung  
20  $U_1$  oder  $U_2$  sowie das Spannungs-Minimum und den nachfolgenden Nulldurchgang jeweils das Maximum bzw. Minimum des zugehörigen Phasenstromes  $I_1$  bzw.  $I_2$  ermittelt. Es wird also jeweils das Maximum des Phasenstromes  $I_1$  bzw.  $I_2$  ermittelt, das zwischen einem Maximum der zugeordneten Spannung  $U_1$  oder  $U_2$  und dem nachfolgenden Nulldurchgang liegt, sowie das Minimum des jeweiligen Phasenstromes  $I_1$  bzw.  $I_2$ , das zwischen  
25 einem Minimum und einem nachfolgenden Nulldurchgang der zugehörigen Spannung  $U_1$  oder  $U_2$  liegt.

- Dies sei beispielhaft anhand Figur 7a erläutert, die die beiden Phasenströme  $I_1$  und  $I_2$  sowie die zugehörigen Spannungen  $U_1$ ,  $U_2$  für einen Stromwinkel von  $120^\circ$  bei einer  
30 Antriebseinrichtung zeigt, die keine zu detektierenden Fehler aufweist. Es ist erkennbar, dass zwischen dem Maximum und dem nachfolgenden Nulldurchgang der einen Spannung  $U_1$  ein Maximum des zugehörigen Phasenstromes  $I_1$  liegt. Entsprechend liegt zwi-

schen dem Minimum des einen Phasenstromes  $U_1$  und seinem nachfolgenden Nulldurchgang wiederum ein Minimum des zugehörigen Phasenstromes  $I_1$ . Entsprechendes gilt für die andere Spannung  $U_2$  und den zugehörigen Phasenstrom  $I_2$ .

- 5 Aus jeder drei Messreihen, die bei den Stromwinkeln  $120^\circ$ ,  $240^\circ$  sowie  $360^\circ$  aufgenommen werden, ergeben sich somit jeweils zwei Paare von Stromwerten für die Phasenströme  $I_1$  und  $I_2$ , nämlich zwei Stromwerte für den ersten Phasenstrom  $I_1$  und zwei Stromwerte für den zweiten Phasenstrom  $I_2$ . Denn aus jeder Halbperiode der zugehörigen Spannung  $U_1$  bzw.  $U_2$  wird jeweils ein zugehöriger Stromwert des entsprechenden Phasenstromes  $I_1$  bzw.  $I_2$  bestimmt.

- 15 Vergleicht man nun die Darstellung gemäß Figur 8a mit der Darstellung gemäß Figur 7a, so zeigt sich, dass aufgrund des fehlerhaften oberen IGBT 26a des ersten Paares 26a, 26b der erste Phasenstrom  $I_1$  zwischen dem Maximum und dem nachfolgenden Nulldurchgang der zugehörigen Spannung  $U_1$  kein eigenes Maximum annimmt. Der Phasenstrom  $I_1$  ist über den gesamten Bereich (bis auf Rauschen) im Wesentlichen gleich null. Das Fehlen des Strom-Maximums weist also darauf hin, dass sich der Phasenstrom  $I_1$  hier nicht entsprechend der zugrundeliegenden Spannung  $U_1$  verhält, was wiederum in Hinweis auf einen nicht einschaltenden IGBT 26a ist.

20

Zur systematischen Auswertung der Messreihen der Phasenströme  $I_1$ ,  $I_2$  auf der Grundlage des vorstehend erläuterten Prinzips wird wie folgt vorgegangen:

- 25 Die ermittelten Strom-Maxima und Strom-Minima (die jeweils zwischen einem Maximum und einem Nulldurchgang bzw. einem Minimum und einem Nulldurchgang der zugrundeliegenden elektrischen Spannung auftreten) werden daraufhin bewertet, ob sie ein tatsächliches Strom-Maximum bzw. Strom-Minimum darstellen oder ob lediglich das Maximum bzw. Minimum eines Rauschens gemessen wurde, der Strom aber tatsächlich im  
30 Wesentlichen gleich null ist. Hierzu werden die Beträge der gemessenen Strom-Maxima bzw. Strom-Minima mit dem maximalen gemessenen Stromwert  $I_{\text{mess}}$  verglichen, und zwar unter Verwendung eines Bewertungsfaktors  $k$ . Dieser kann beispielsweise den Wert

- $k = 0.2$  aufweisen. Die in der oben erläuterten Weise ermittelten Maxima und Minima der Phasenströme  $I_1$ ,  $I_2$  werden dann jeweils danach bewertet, ob sie vom Betrag her größer oder kleiner sind als das  $k$ -fache des größten überhaupt gemessenen Stromes  $I_{\text{mess}}$ . Nur wenn ersteres der Fall ist, wird das Vorliegen eines echten Strom-Maximums bzw. -
- 5 Minimums angenommen. Ansonsten wird davon ausgegangen, dass der entsprechende Strom im Wesentlichen gleich null ist und lediglich Rauschen gemessen wurde.

Für die Bildung einer systematisch auswertbaren Tabelle gelten dann folgende Formeln:

- 10 Wenn  $|I| > k \cdot |I_{\text{mess}}|$  &  $I > 0$ , dann wird dem entsprechenden Strom  $I$  der Wert „1“ zugeordnet. (Der Strom  $I$  steht dabei wahlweise für die Messwerte des Phasenstromes  $I_1$  oder  $I_2$ .)
- Falls  $|I| \leq k \cdot |I_{\text{mess}}|$ , dann wird dem entsprechenden Strom  $I$  der Wert „0“ zugeordnet.
- 15 Falls  $|I| > k \cdot |I_{\text{mess}}|$  &  $I < 0$ , dann wird dem entsprechenden Strom  $I$  der Wert „-1“ zugeordnet.

- Es werden also zum Detektieren eines Fehlers nicht die tatsächlich gemessenen Stromwerte unmittelbar ausgewertet, sondern es wird jeweils dem Stromverlauf zwischen einem Maximum der zugrundeliegenden Spannung und einem Nulldurchgang der zugrundeliegenden Spannung der Wert „1“ oder „0“ zugeordnet, wobei der Wert „1“ bedeutet, dass in dem besagten Bereich ein Strom-Maximum aufgetreten ist und der Wert „0“ bedeutet, dass der Strom in dem entsprechenden Bereich im Wesentlichen gleich null ist. In entsprechender Weise wird dem jeweils gemessenen Strom zwischen einem Spannungs-Minimum und dem nachfolgenden Nulldurchgang der Wert „-1“ zugeordnet, wenn hier ein tatsächliches Minimum des entsprechenden Stromes aufgetreten ist, ansonsten der Wert „0“. So lassen sich die Ergebnisse der Strommessungen in einer Tabelle darstellen, wobei jedem der betrachteten Strom-Winkel  $120^\circ$ ,  $240^\circ$  sowie  $360^\circ$  jeweils vier Stromwerte zugeordnet sind, nämlich jeweils zwei Werte des ersten Phasenstromes  $I_1$
- 20
- 25
- 30 und zwei Werte des zweiten Phasenstromes  $I_2$ . Diese Werte werden wiederum danach sortiert, ob sie den Bereich zwischen einem Maximum und einem nachfolgenden Null-

durchgang oder zwischen einem Minimum und einem nachfolgenden Nulldurchgang der zugehörigen Spannung repräsentieren.

5 Diese Tabelle lässt sich dann in gleicher Weise auswerten, wie weiter oben die tatsächlich gemessenen Stromverläufe anhand der Figuren 7a bis 15c ausgewertet worden sind. Dies wurde anhand der Figuren 7a und 8a bereits erläutert und gilt auch für die weiteren Figuren. Denn die obige Auswertung hat gezeigt, dass es für die Feststellung eines Fehlers nicht auf den gesamten gemessenen Stromverlauf ankommt, sondern lediglich darauf, ob der jeweils gemessene Phasenstrom in einem bestimmten Bereich der zugehörigen elektrischen Spannung größer als null, gleich null oder kleiner als null ist. Dies lässt sich mit dem zur Bildung der Tabelle angewandten Kriterium unter Bestimmung der Strom-Maxima bzw. -Minima erfassen.

10  
15 besondere lässt sich, wie anhand der Figuren 7a bis 15c demonstriert, unterscheiden, ob ein Fehler in einem IGBT vorliegt oder eine der Phasen 11, 12, 13 des Antriebsmotors 1 offen ist. Im letztgenannten Fall ist der zugehörige Phasen-Strom unabhängig von der zeitlich variierten Spannung stets gleich null, während im erstgenannten Fall der entsprechende Phasen-Strom nur dann gleich null ist, wenn er von dem fehlerhaften IGBT abhängt. Das fehlerhafte Verhalten eines IGBT kann dabei seine Ursache auch in der zugehörigen Ansteuerlogik haben.

20  
25 Die besagten Fehler im Umrichter 2 einerseits und im Antriebsmotor 1 andererseits lassen sich auch von einem Defekt eines der beiden Stromsensoren 41, 42 („Stromsensor hängt auf Vollausschlag“) unterscheiden. Denn bei einem Defekt eines der Stromsensoren 41, 42 ist zu erwarten, dass der Stromsensor unabhängig von irgendeiner der Spannungen stets denselben Stromwert liefert.

30 Es wird nun anhand der tabellarischen Darstellung in Figur 17 erläutert werden, wie der bei der Beschreibung des Gesamtverfahrens anhand des Flussdiagramms in Figur 2 erwähnte Test auf einen Kurzschluss zwischen zwei Phasen des Antriebsmotors 1 durchgeführt wird. Dieser Test wird immer dann durchgeführt, wenn bei den Messungen der Phasenströme I1, I2 ein Überstrom aufgetreten ist, vgl. Figur 2.

Zum Test auf Phasen-Kurzschluss werden insgesamt drei Strom-Messungen durchgeführt, und zwar bei den Stromwinkeln  $90^\circ$ ,  $210^\circ$  sowie  $330^\circ$ . Bei diesen Stromwinkeln liegen jeweils zwei der Phasen 11, 12, 13 auf einem identischen Potential, während die  
5 dritte Phase auf einem hiervon abweichenden, anderen Potential liegt. An den beiden ersten Phasen liegt also ein übereinstimmender erster Spannungswert, z.B.  $-U/2$ , und an der dritten Phase ein hiervon abweichender anderer Spannungswert, z.B.  $U$ .

10 Wird bei einem der drei Messschritte ein Kurzschluss beobachtet, entsprechend einem Überstrom in mindestens einem der IGBTs, so kann dieser nicht zwischen den beiden Phasen vorliegen, die ein übereinstimmendes elektrisches Potential aufweist. Denn bei einem übereinstimmenden elektrischen Potential erzeugen selbst kurzgeschlossene Leitungen keinen Stromfluss. Eine entsprechende Entscheidungsmatrix ist in Figur 17 dargestellt.

15

In den drei Messschritten werden demnach die drei Spannungen  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$  der Phasen 11, 12, 13 des Antriebsmotors 1 variiert, wie vorstehend dargelegt, wobei jeweils eine der Phasen auf das Potential „U“ und die beiden anderen Phasen auf das Potential „ $-U/2$ “  
20 gelegt werden. In Abhängigkeit von der Verteilung der Werte „0“ und „1“ an der Fehlerausgabe „-ERR“ lässt sich dann ermitteln, ob kein Kurzschluss vorliegt und ggf. welche beiden der drei Phasen 11, 12, 13 kurzgeschlossen sind.

25 Endet der Test auf Kurzschluss zwischen zwei Phasen 11, 12, 13 des Antriebsmotors 1 mit dem Ergebnis, dass bei allen drei Messschritten jeweils der Wert „0“ an der Fehlerausgabe „-ERR“ anliegt, so wird gemäß Figur 2 überprüft, ob die Ursache für einen zuvor detektierten Überstrom in einem IGBT auf einen Erdschluss einer der Phasen 11, 12, 13 des Antriebsmotors 1 zurückzuführen ist. Alternativ kann ein Kurzschluss in einem IGBTs selbst vorliegen.

30

Zur Durchführung des Testes 400 auf Erdschluss werden gemäß Figur 18 zunächst alle PWM-Signale PWM1, PWM2 und PWM3 fest auf den Wert „0“ gelegt (401). Dies bedeu-

tet, dass bei den drei IGBT-Paaren des Umrichters 2 jeweils der untere IGBT 26b, 27b und 28b eingeschaltet ist. Eine hierbei auftretende Abschaltung 402 wegen Überstromes wird als „Err0“ gespeichert. Anschließend werden die drei PWM-Signale PWM1, PWM2, PWM3 jeweils auf den Wert „1“ gelegt, so dass die oberen IGBTs 26a, 27a und 28a eingeschaltet sind (403). Ein hierbei gemessener Überstrom wird im nächsten Schritt 404 als „Err1“ gespeichert.

10 Nachfolgend wird in einem weiteren Schritt 405 überprüft, ob sowohl der Fehler „Err0“ als auch der Fehler „Err1“ vorliegt. In diesem Fall wird eine Fehlermeldung 406 ausgegeben, wonach ein Erdschluss vorliegt. Denn beim Vorliegen eines Erdschlusses tritt in der entsprechenden Phase 11, 12 oder 13 des Antriebsmotors 1 ein Überstrom unabhängig davon auf, welcher der beiden jeweils zugeordneten IGBTs eingeschaltet ist.

15 Wird demgegenüber die Abfrage bei 405 verneint, so wird in zwei weiteren Schritten 407 und 409 geprüft, ob einer der beiden Fehler „Err0“ oder „Err1“ vorliegt. Im erstgenannten Fall liegt ein Kurzschluss in einem der oberen IGBTs 26a, 27a, 28a vor, mit denen die Motorphasen U1, U2 und U3 auf die obere Zwischenkreisspannung  $U_z/2$  geschaltet werden können. Im anderen Fall liegt ein Kurzschluss in einem der unteren IGBTs 26b, 27b, 28b vor, mit denen die untere Zwischenkreisspannung  $-U_z/2$  auf die jeweilige Motorphase U1, U2 bzw. U3 gelegt werden kann. Der Grund hierfür liegt darin, dass bei in m Kurzschluss innerhalb eines IGBT eine Abschaltung wegen eines Überstromes genau dann erfolgt, wenn der jeweils andere IGBT desselben IGBT-Paares eingeschaltet ist.

25 Die Detektion eines Kurzschlusses in einem der oberen oder der unteren IGBTs führt zu einer entsprechenden Fehlermeldung 408 bzw. 411. Eine separate Fehlermeldung 412 erfolgt, wenn bei der Durchführung des Testes weder ein Erdschluss noch ein Kurzschluss in einem der IGBTs detektiert worden ist. Dies kann auch auf einen Fehler bei der Ausführung des Testes selbst hindeuten.

\* \* \* \* \*



**Patentansprüche**

- 5 1. Verfahren zur Fehlererkennung bei einer Antriebseinrichtung mit einem Mehrphasen-Elektromotor und einem dem Elektromotor nachgeschalteten Stromrichter, bei der der Stromrichter die Spannung an den einzelnen Phasen des Elektromotors steuert und die Phasenströme in den Phasen des Elektromotors jeweils periodisch verlaufen, wobei zur Fehlererkennung mehrere Phasenströme ( $I_1$ ,  $I_2$ ) des Elektromotors an einem vorgegebenen Punkt der jeweiligen Periode bei gleichzeitiger Variation der zugehörigen Spannungen ( $U_1$ ,  $U_2$ ) an den entsprechenden Phasen (11, 12) des Elektromotors (1) gemessen werden und Messwerte der Phasenströme ( $I_1$ ,  $I_2$ ) in Abhängigkeit von der Spannung ( $U_1$ ,  $U_2$ ) an der entsprechenden Phase (11, 12) des Elektromotors (1) ausgewertet werden.
- 10
- 15
2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass durch Auswertung der Phasenströme ( $I_1$ ,  $I_2$ ) in Abhängigkeit von der zugehörigen Spannung ( $U_1$ ,  $U_2$ ) zwischen einem Fehler in dem Stromrichter (2) und einer Unterbrechung des Stromflusses in einer Phase (11, 12, 13) des Elektromotors (1) unterschieden wird.
- 20
3. Verfahren nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Unterbrechung des Stromflusses durch einen Leitungsbruch oder einen nichtgeschlossenen elektrischen Kontakt bewirkt ist.
- 25
4. Verfahren nach Anspruch 2 oder 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Fehler in dem Stromrichter (2) durch ein fehlerhaftes Stromrichterventil (26a, 26b; 27a, 27b; 28a, 28b), insbesondere in Form eines Transistors oder eines Thyristors, verursacht ist.
- 30

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 2 bis 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass bei einer Unterbrechung in einer Phase (11, 12, 13) des Elektromotors (1) der entsprechende Phasenstrom (I1, I2, I3) unabhängig von dem Wert der zugehörigen Spannung (U1, U2, U3) gleich null ist und bei einem Fehler in einem Stromrichterv ntil (26a bis 28b) des Stromrichters (2) der entsprechende Phasenstrom (I1, I2, I3) nur für einen Teil der Werte der zugehörigen Spannung (U1, U2, U3) gleich null ist.
6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass mindestens einer der Phasenströme (I1, I2, I3) an den Punkt der Periode, an dem eine Messung durchgeführt wird, gleich null ist.
7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die einzelnen Phasenströme (I1, I2, I3) um einen konstanten Betrag zueinander phasenverschoben sind und die Messung von Phasenströmen (I1, I2.) an einem konstanten Punkt (120°, 240°, 360°) einer der Perioden der Phasenströme (I1, I2, I3) erfolgt.
8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Verhältnis der Spannungen (U1, U2), die während der jeweiligen Strommessung ungleich null sind, während der Messung konstant bleibt, und dass deren Summe während der Messung gleich null ist..
9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Spannungen (U1, U2, U3) an den Phasen (11, 12, 13) des Elektromotors (1) während der jeweiligen Strommessung periodisch variiert werden.

10. Verfahren nach Anspruch 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Spannungen ( $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$ ) während der jeweiligen Strommessung genau eine Periode durchlaufen.
- 5 11. Verfahren nach Anspruch 10 oder 11, **dadurch gekennzeichnet**, dass die variierten Spannungen ( $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$ ) Nulldurchgänge aufweisen, insbesondere sinusförmig verlaufen.
- 10 12. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass mehrere Messungen der Phasenströme ( $I_1$ ,  $I_2$ ) zur Fehlererkennung an jeweils einem vorgegebenen Punkt der Periode durchgeführt werden.
- 15 13. Verfahren nach Anspruch 12, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Anzahl der Strommessungen an unterschiedlichen Punkten der Periode der Anzahl der Phasen ( $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ ) des Elektromotors (1) entspricht.
- 20 14. Verfahren nach Anspruch 6 und Anspruch 13, **dadurch gekennzeichnet**, dass bei jeder der Messungen ein anderer der Phasenströme ( $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ ) gleich null ist.
- 25 15. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass zur Auswertung der gemessenen Phasenströme ( $I_1$ ,  $I_2$ ) die Messwerte an anhand des Verlaufs der zugehörigen Spannungen ( $U_1$ ,  $U_2$ ) bestimmbar Punkten des jeweiligen Stromverlaufs ausgewertet werden.
- 30 16. Verfahren nach einem der Ansprüche 9 bis 11 und Anspruch 15, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Phasenströme ( $I_1$ ,  $I_2$ ) jeweils an ihrem Maximum oder Mi-

nimum zwischen einem Maximum bzw. Minimum und einem Nulldurchgang der zugehörigen Spannung ( $U_1$ ,  $U_2$ ) ausgewertet werden.

- 5     17. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass zur Auswertung der gemessenen Phasenströme ( $I_1$ ,  $I_2$ ) die Messwerte in tabellarischer Form abgelegt werden.
- 10    18. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Verhalten eines der Phasenströme ( $I_3$ ) aus den Messwerten der anderen Phasenströme ( $I_1$ ,  $I_2$ ) bestimmt wird.
- 15    19. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Eingangssignale (PWM.U1, PWM.U2, PWM.U3) des Stromrichters (2) in Abhängigkeit von Ausgangssignalen (PWM1, PWM2, PWM3) eines Reglers (3) gebildet werden, wobei der Regler (3) PWM-Signale erzeugt.
- 20    20. Verfahren nach Anspruch 19, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Ausgangssignale (PWM1, PWM2, PWM3) des Reglers (3) an der Schnittstelle zwischen Regler (3) und Stromrichter (2) im Hinblick auf Fehler in den Signalen mittels einer Auswertschaltung (5) überprüft werden.
- 25    21. Verfahren nach Anspruch 20, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Ausgangssignale (PWM1, PWM2, PWM3) des Reglers (3) nach einem vorgegebenen Muster variiert werden und dass in Abhängigkeit hiervon eingangsseitig an dem Stromrichter
- 30    (2) erzeugte Spannungssignale (PWM.U1, PWM.U2, PWM.U3) gemessen und ausgewertet werden.

22. Verfahren nach Anspruch 21, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein Fehler als erkannt gilt, wenn ein aufgrund der Ausgangssignale (PWM1, PWM2, PWM3) des Reglers (3) erwartetes Spannungssignal (PWM.U1, PWM.U2, PWM.U3) nicht auftritt.
23. Verfahren nach Anspruch 21 oder 22, **dadurch gekennzeichnet**, dass zur Auswertung der Spannungssignale (PWM.U1, PWM.U2, PWM.U3) verschiedene, durch die Ausgangssignale (PWM1, PWM2, PWM3) des Reglers (3) erzeugte eingangsseitige Spannungssignale (PWM.U1, PWM.U2, PWM.U3) des Stromrichters (2) miteinander verknüpft werden.
24. Verfahren nach Anspruch 23, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Spannungssignale (PWM.U1, PWM.U2, PWM.U3) durch mindestens ein logisches Gatter (56, 57), insbesondere in Form eines EXOR-Gatters, miteinander verknüpft werden.
25. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass bei Auftreten eines Überstromes während der Messung der Phasenströme (I1, I2, I3) zusätzlich geprüft wird, ob zwischen zwei Phasen (11, 12, 13) des Elektromotors (1) ein Kurzschluss vorliegt.
26. Verfahren nach Anspruch 25, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Prüfung auf Kurzschluss dann erfolgt, wenn ein Überstrom in einem Stromrichterventil (26a bis 28b) des Stromrichters (2) aufgetreten ist.

27. Verfahren nach Anspruch 25 oder 26, **dadurch gekennzeichnet**, dass zur Prüfung auf Kurzschluss jeweils zwei Phasen (11, 12; 11, 13; 12, 13) des Elektromotors (1) auf das gleiche elektrische Potential ( $-U/2$ ) gelegt werden.
- 5
28. Verfahren nach Anspruch 27, **dadurch gekennzeichnet**, dass nacheinander jeweils unterschiedliche Phasen (11, 12; 11, 13; 12, 13) des Elektromotors (1) auf das gleiche elektrische Potential ( $-U/2$ ) gelegt werden, um durch Auswertung der hierbei auftretenden Ströme festzustellen, zwischen welchen Phasen ein Kurzschluss vorliegt.
- 10
29. Verfahren nach Anspruch 27 oder 28, **dadurch gekennzeichnet**, dass zur Festlegung der elektrischen Potentiale ( $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$ ) der einzelnen Phasen (11, 12, 13) die Stromwinkel der entsprechenden Phaseströme ( $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ ) festgelegt werden.
- 15
30. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass bei Vorliegen eines Überstromes in einem Stromrichterventil (26a bis 28b) des Stromrichters (2) geprüft wird, ob bei einer der Phasen (11, 12, 13) des Elektromotors (1) ein Erdschluss vorliegt.
- 20
31. Verfahren nach Anspruch 30, **dadurch gekennzeichnet**, dass zur Prüfung auf Erdschluss die den einzelnen Phasen (11, 12, 13) des Elektromotors (1) vorgeschalteten elektrischen Schaltungen (21, 22, 23) des Stromrichters (2) jeweils mit identischen Eingangssignalen („0“ oder „1“) beaufschlagt werden.
- 25
32. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass in dem Stromrichter (2) jeder Phase (11, 12, 13) des Elektromotors (1) eine
- 30

elektrische Schaltung (21, 22, 23) zugeordnet ist und dass die elektrischen Schaltungen (21, 22, 23) vorzugsweise identisch ausgebildet sind.

- 5     33. Verfahren nach Anspruch 32, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Schaltungen (21, 22, 23) jeweils paarweise angeordnete Transistoren oder Thyristoren, insbesondere in Form paarweise angeordneter IGBTs (26a, 26b; 27a, 27b; 28a, 28b), aufweisen.

10

34. Verfahren nach Anspruch einem der Ansprüche 31 bis 33, **dadurch gekennzeichnet**, dass durch die den einzelnen Phasen (11, 12, 13) des Elektromotors (1) zugeordneten elektrischen Schaltungen (21, 22, 23) in Abhängigkeit von den Eingangssignalen (PWM.U1, PWM.U2, PWM.U3) des Stromrichters (2) jeweils eine von zwei möglichen Spannungen ( $U_z/2$ ,  $-U_z/2$ ) an die entsprechende Phase (11, 12, 13) gelegt wird.

15

35. Verfahren nach Anspruch 30, 31 oder 34, **dadurch gekennzeichnet**, dass zur Durchführung des Tests auf Erdschluss die elektrischen Spannungen (U1, U2, U3) an den drei Phasen (11, 12, 13) des Elektromotors (1) auf identische Werte eingestellt werden.

20

- 25     36. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Mehrphasen-Elektromotor (1) als Dreiphasen-Drehstrommotor ausgebildet ist.

\* \* \* \*

30

### Zusammenfassung

- 5 Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zur Fehlererkennung bei einer Antriebs in-  
richtung mit einem Mehrphasen-Elektromotor und einem dem Elektromotor nachgeschal-  
teten Stromrichter, bei der der Stromrichter die Spannung an den einzelnen Phasen des  
Elektromotors steuert und die Phasenströme in den Phasen des Elektromotors jeweils  
periodisch verlaufen, wobei zur Fehlererkennung mehrere Phasenströme des Elektromo-  
10 tors gemessen werden. Erfindungsgemäß werden zur Fehlererkennung die Phasenströ-  
me (I1, I2) an einem vorgegebenen Punkt der jeweiligen Periode bei gleichzeitiger Varia-  
tion der zugehörigen Spannungen (U1, U2) an den entsprechenden Phasen (11, 12) des  
Elektromotors (1) gemessen.

15

Fig. 1



Fig.1

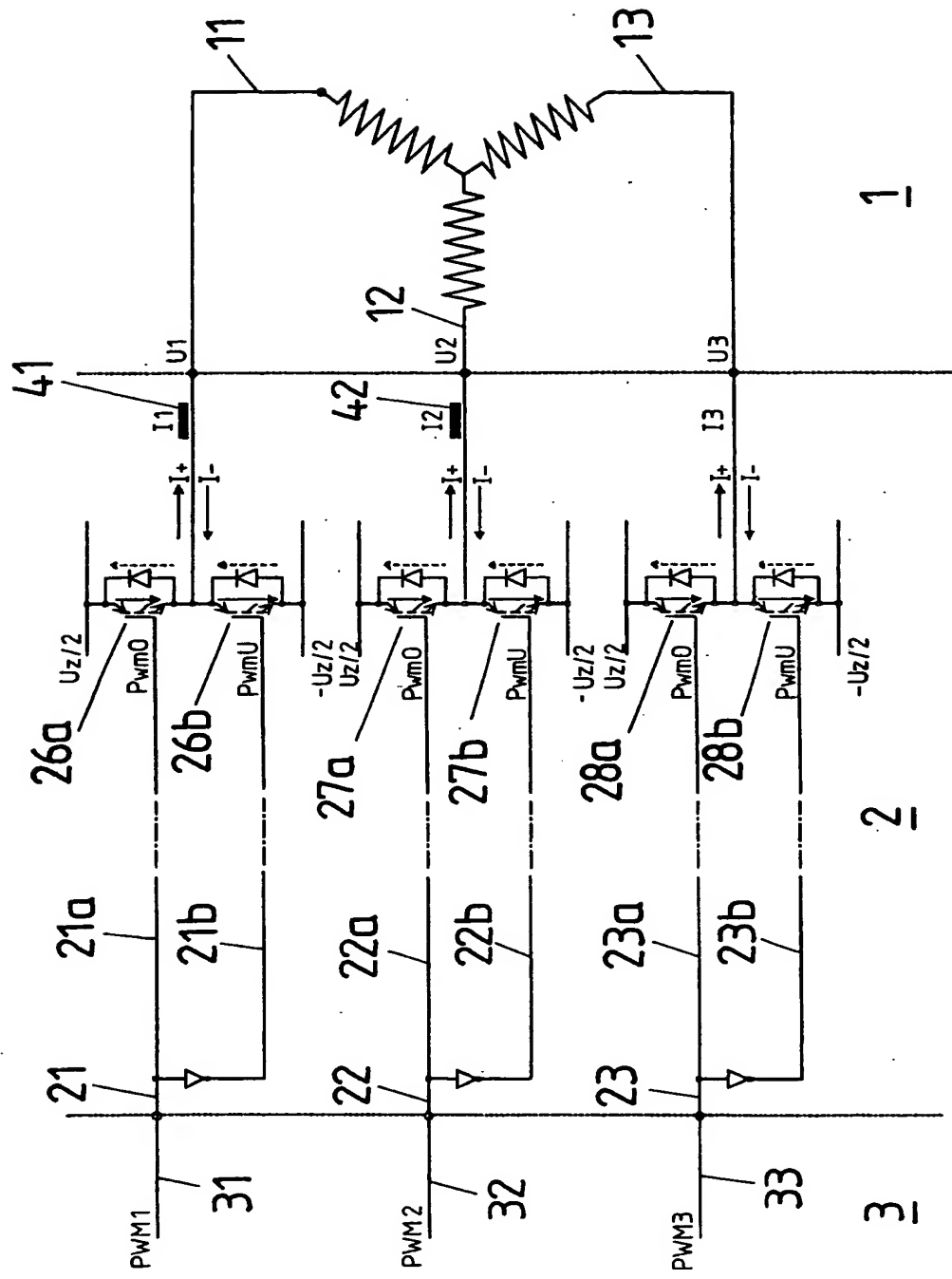


Fig. 2

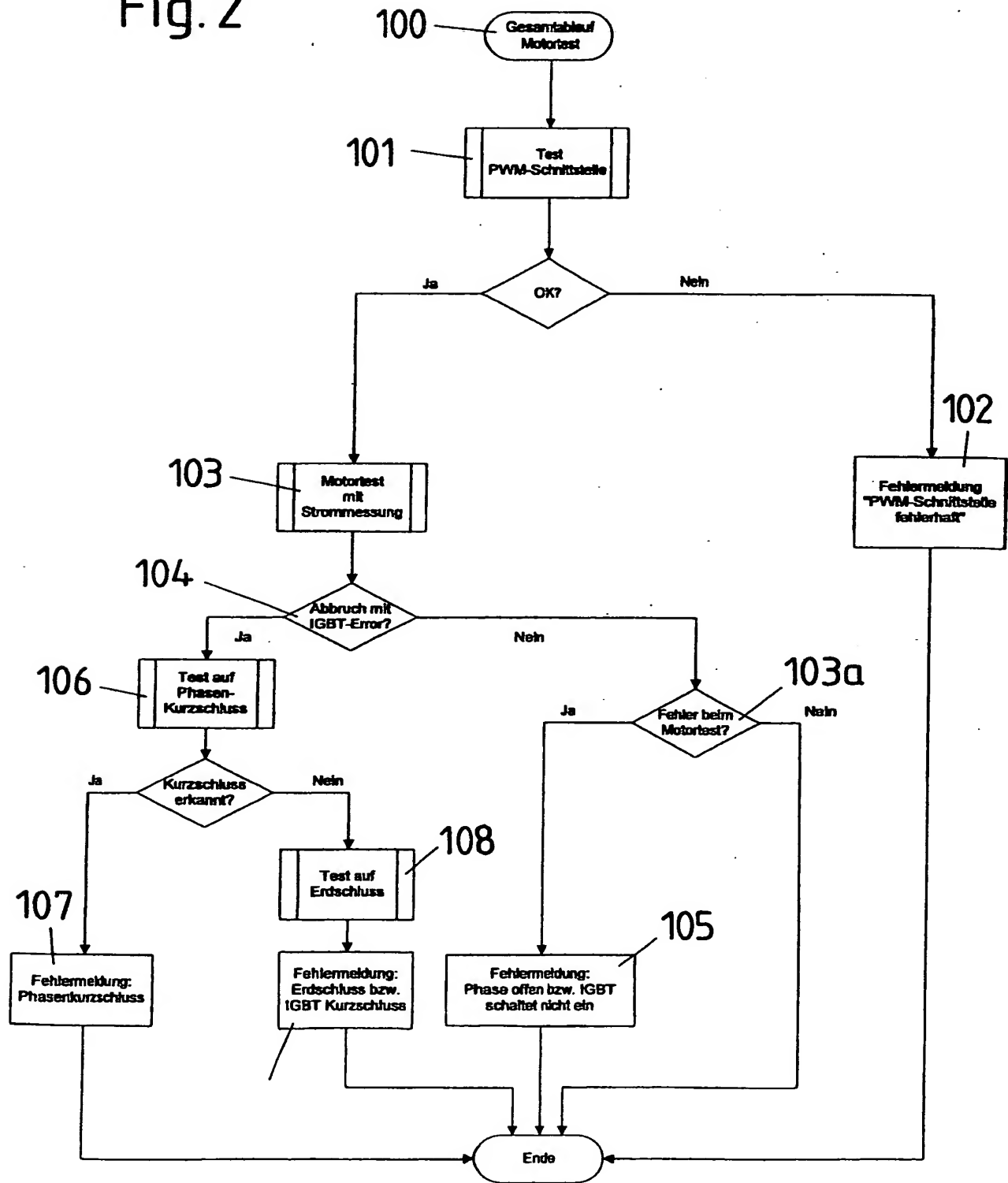


Fig. 3

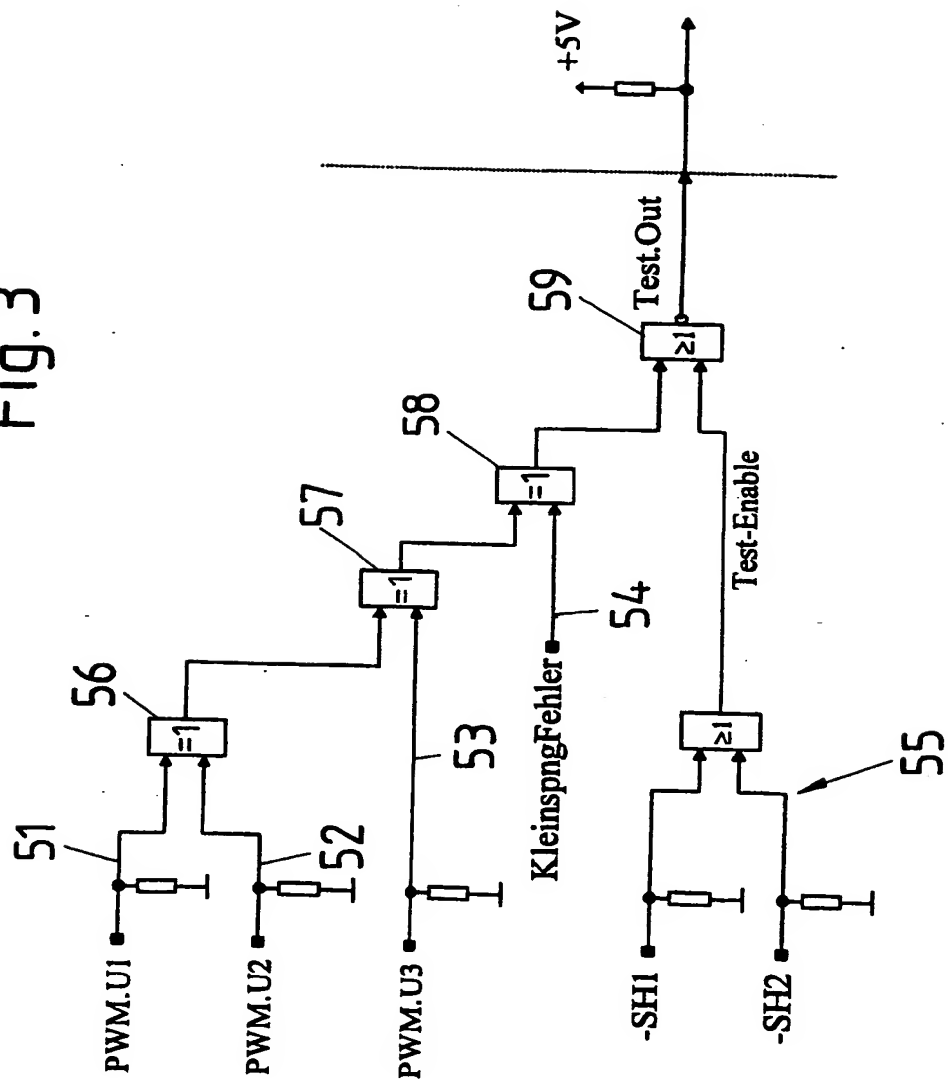


Fig. 4

**PWM - Signale**

PWM1: 0 1 0 0 1 0 1 1

PWM2: 0 0 1 0 1 1 0 1

PWM3: 0 0 0 1 1 1 1 0

**Test. Out:**

**Kleinspannungen OK**

1, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1 // alles OK

1, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 0 // PWM.U1 hängt auf 0

1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0 // PWM.U2 hängt auf 0

1, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 1 // PWM.U3 hängt auf 0

1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 1 // PWM.U1 = PWM.U2

1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 0 // PWM.U2 = PWM.U3

1, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0 // PWM.U1 = PWM.U3

1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0 // PWM.U1 = PWM.U2 = PWM.U3

**Kleinspannungen fehlerhaft**

0, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0 // PWM Signale OK

0, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 1 // PWM.U1 hängt auf 0 + Kleinspannung

0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1 // PWM.U2 hängt auf 0 + Kleinspannung

0, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 0 // PWM.U3 hängt auf 0 + Kleinspannung

0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 0 // PWM.U1 = PWM.U2 + Kleinspannung

0, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 1 // PWM.U2 = PWM.U3 + Kleinspannung

0, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 1 // PWM.U1 = PWM.U3 + Kleinspannung

0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1 // PWM.U1 = PWM.U2 = PWM.U3 + Kleinspannung

**generelle Fehler**

0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0 // SH1 oder SH2 nicht "0"

1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1 // Test - Ausgang offen

Fig.5

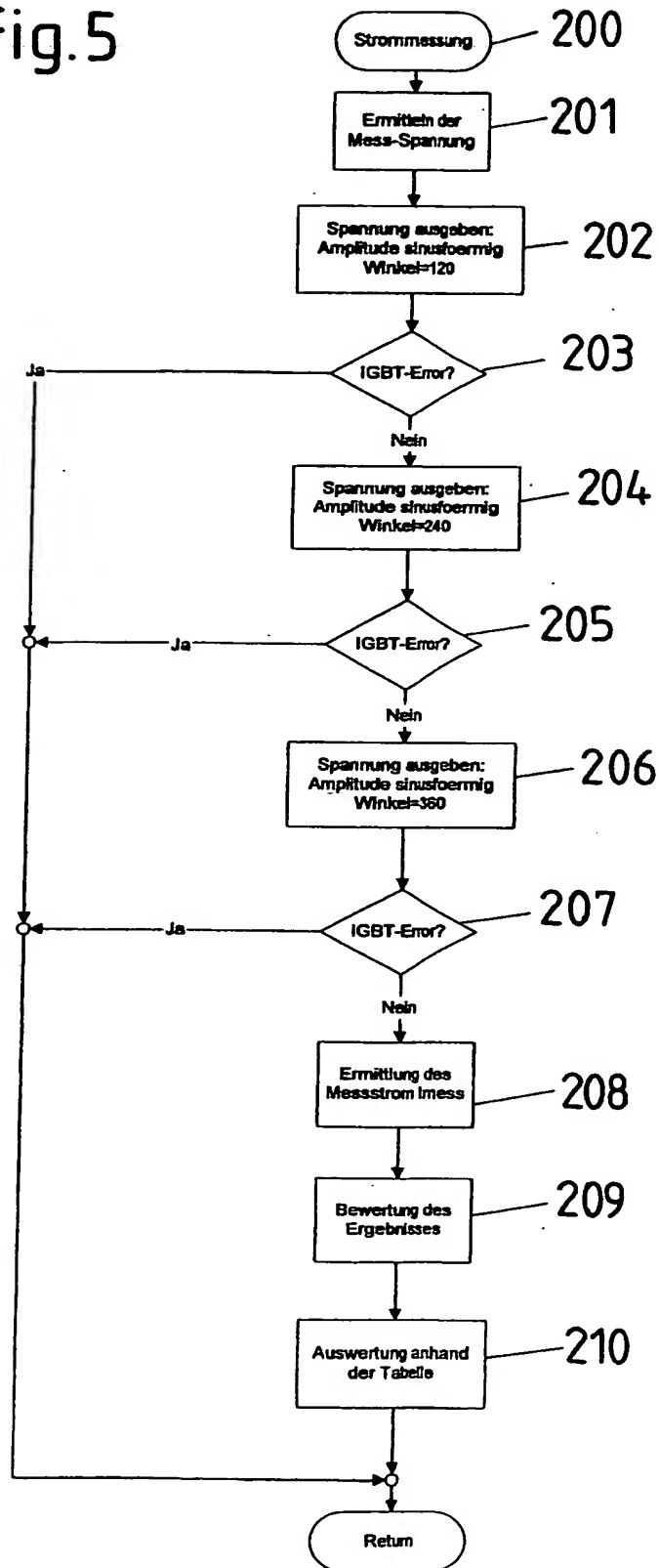
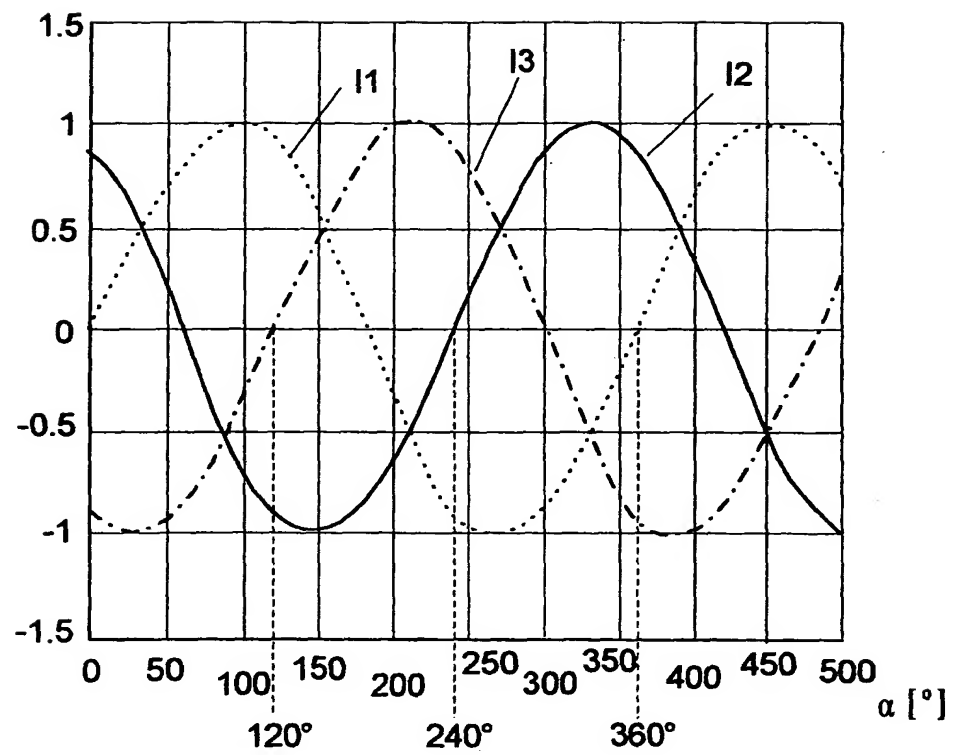
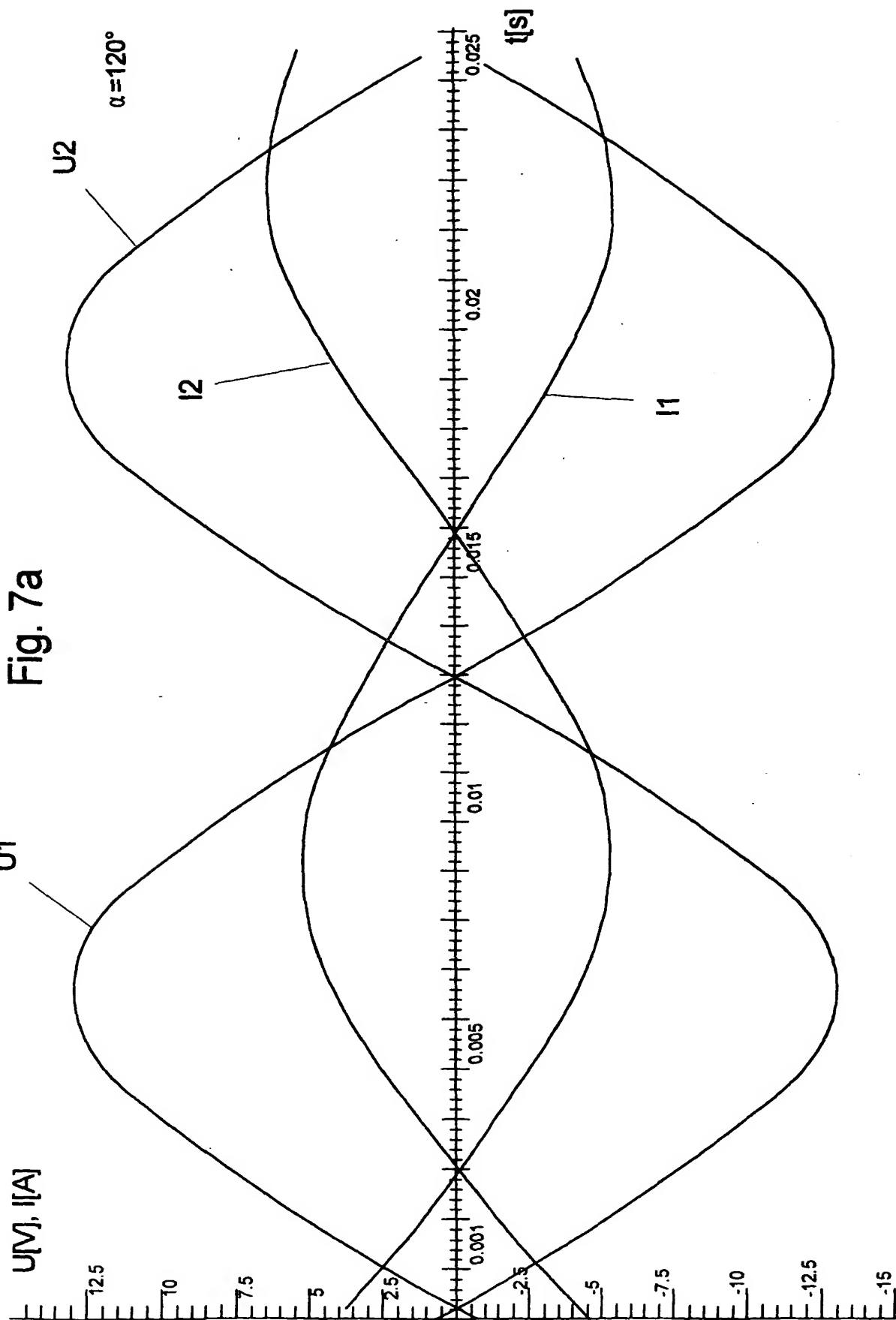


Fig. 6





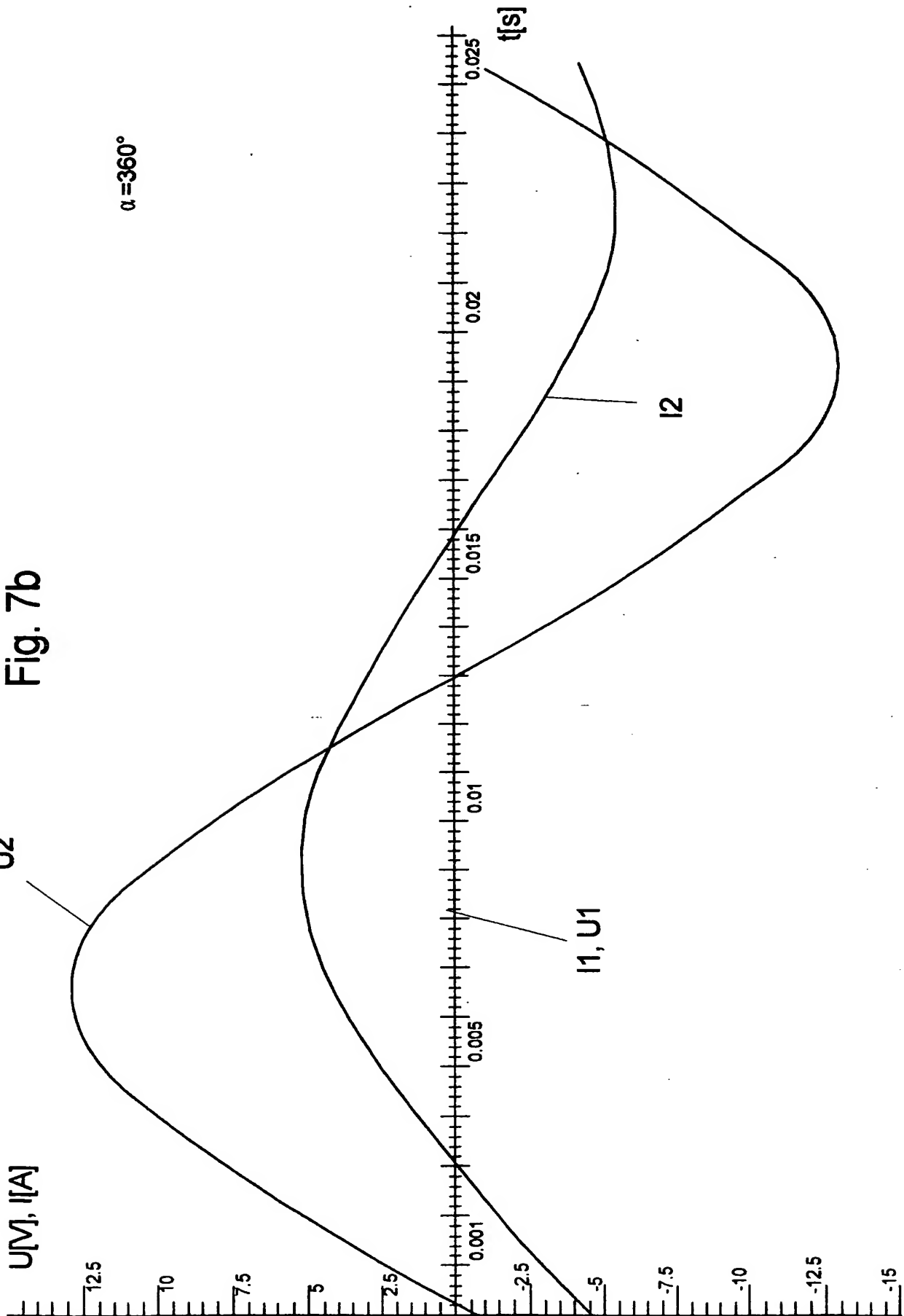
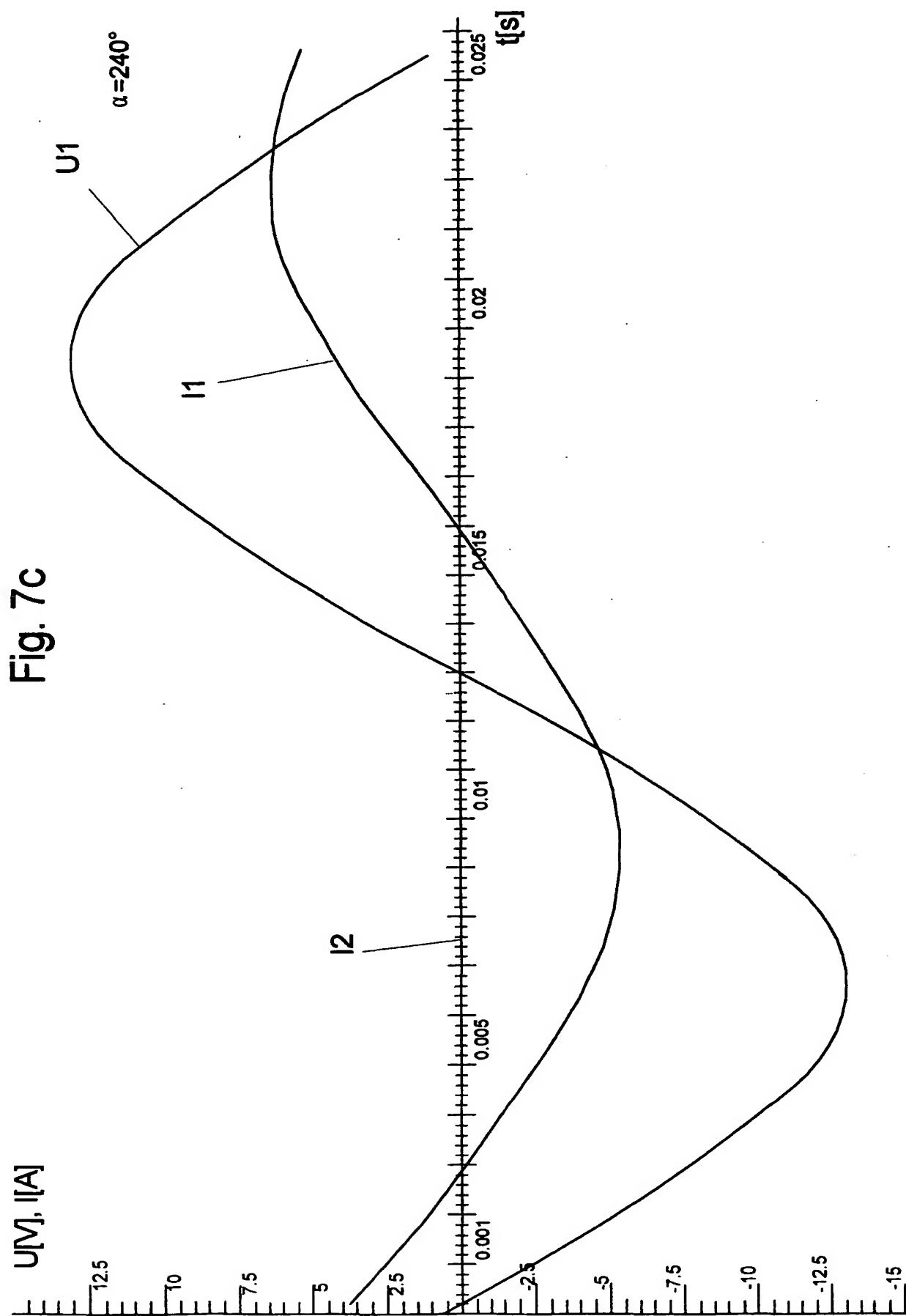


Fig. 7b





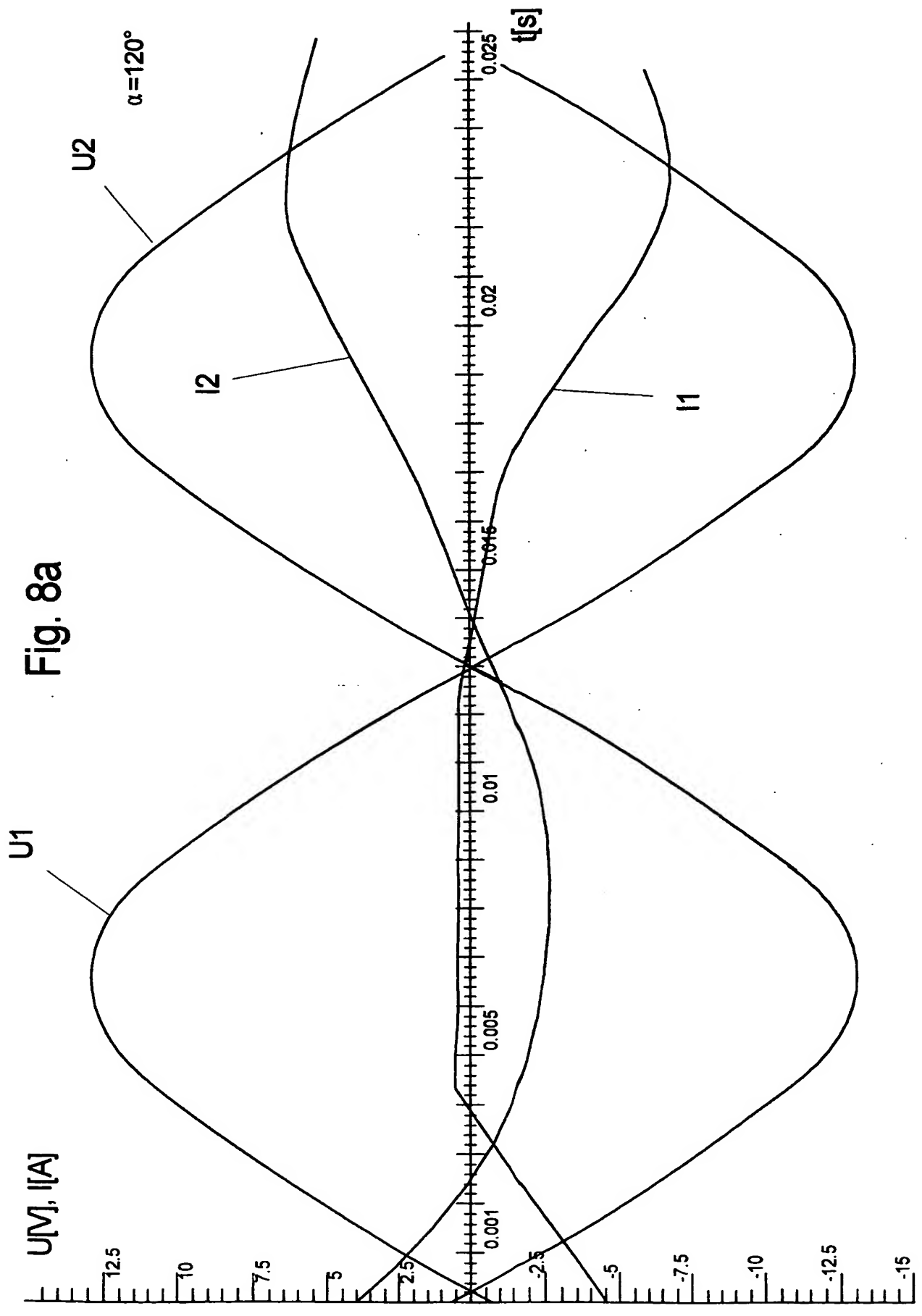


Fig. 8a

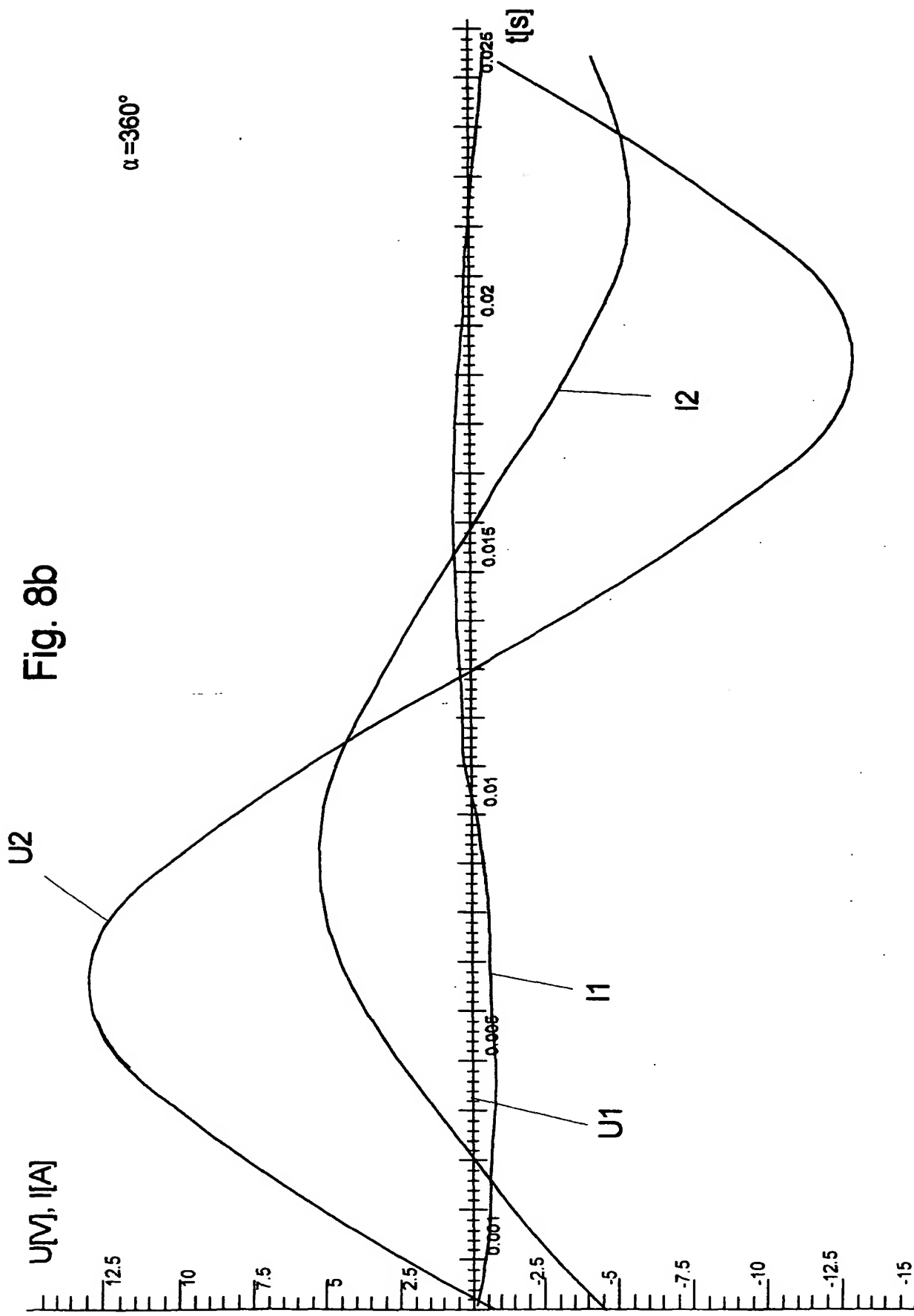
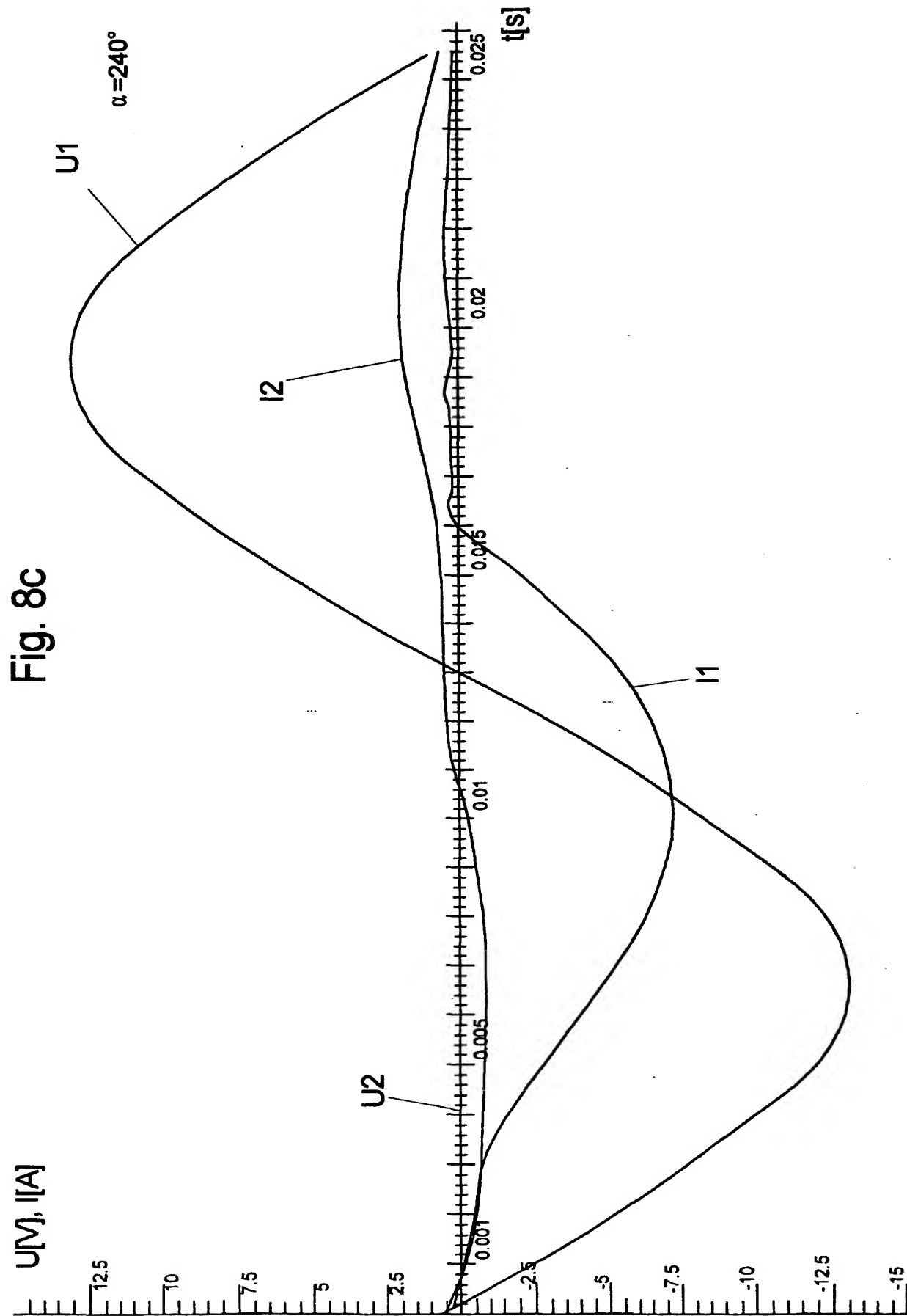


Fig. 8b



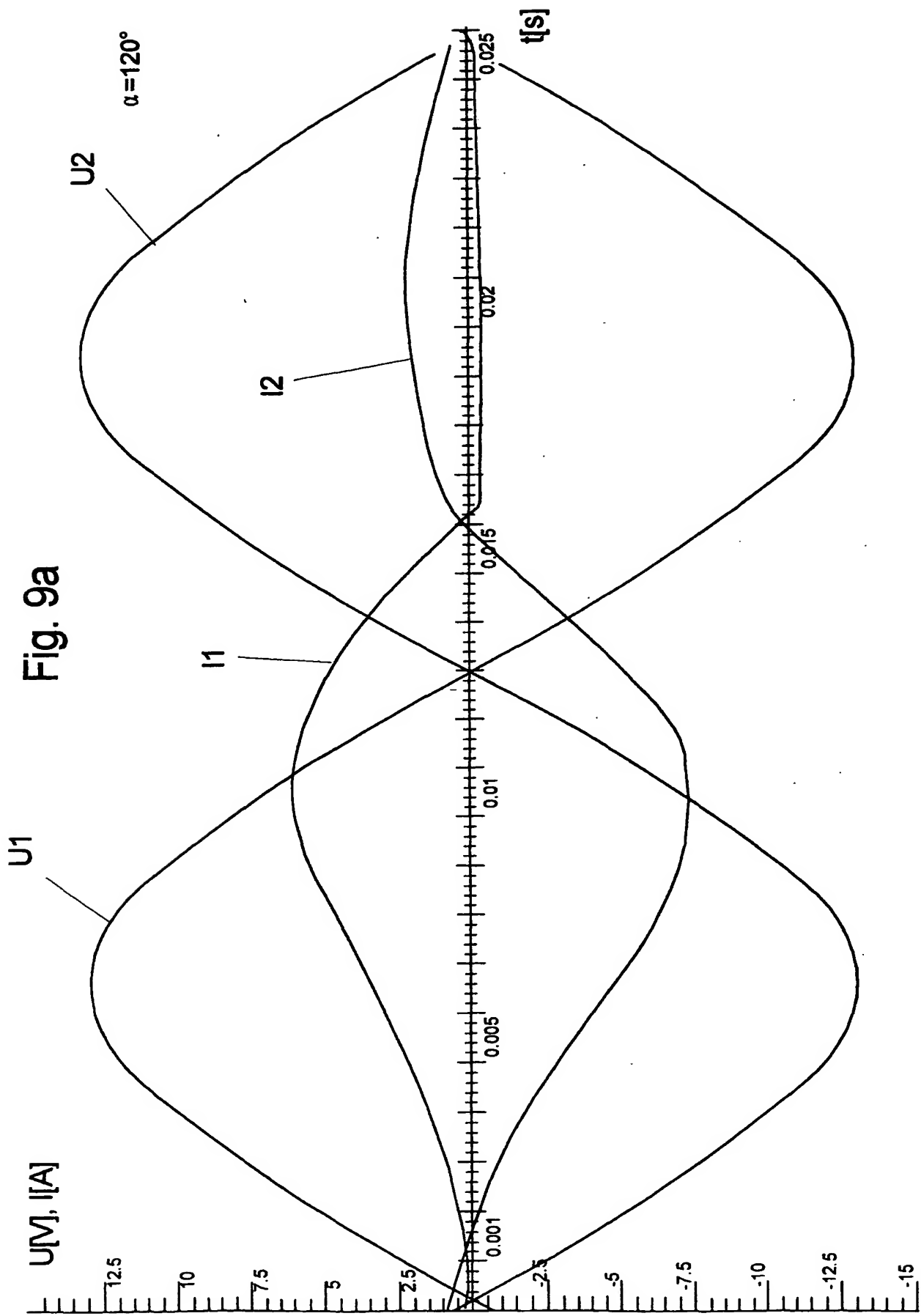


Fig. 9a

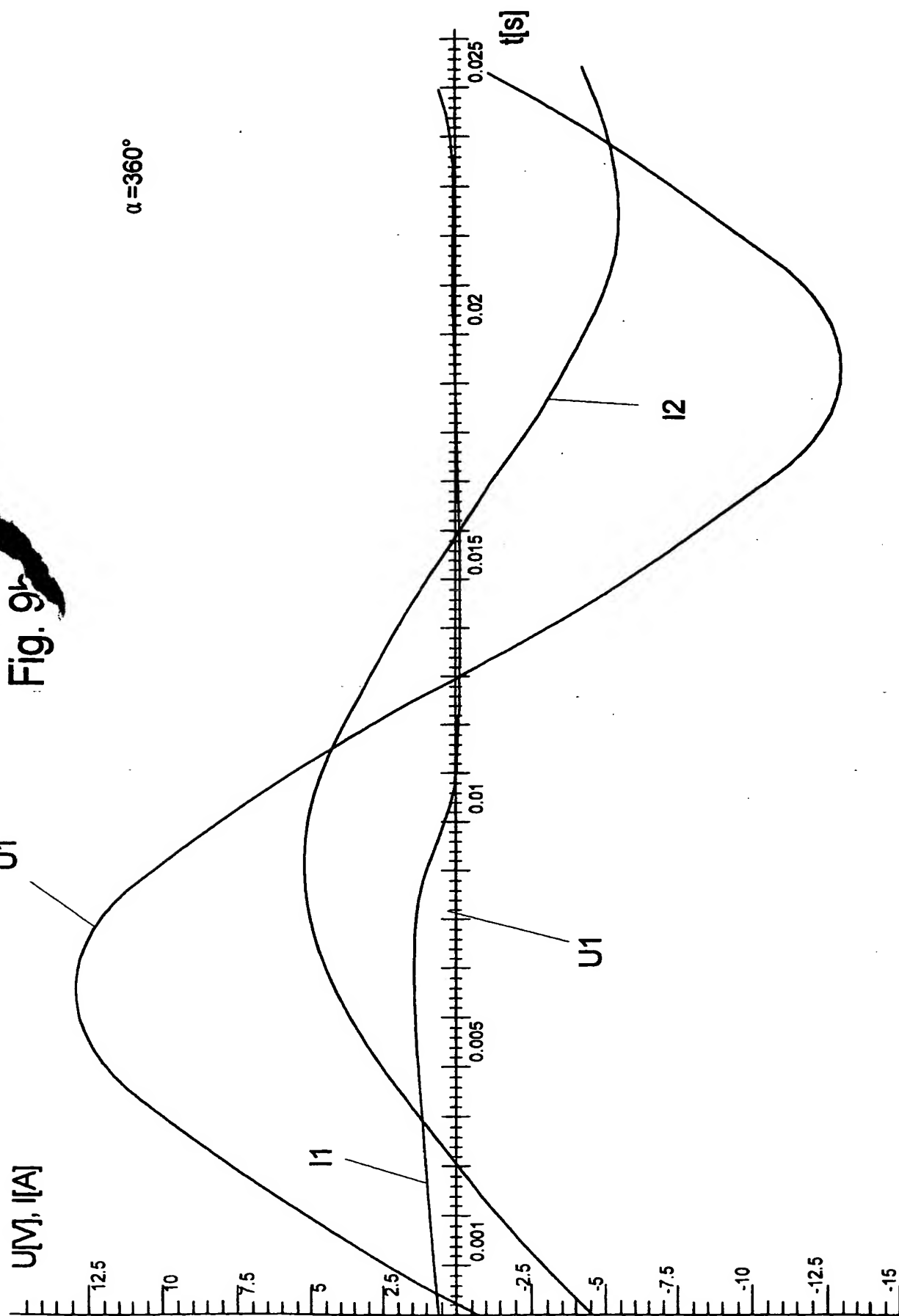
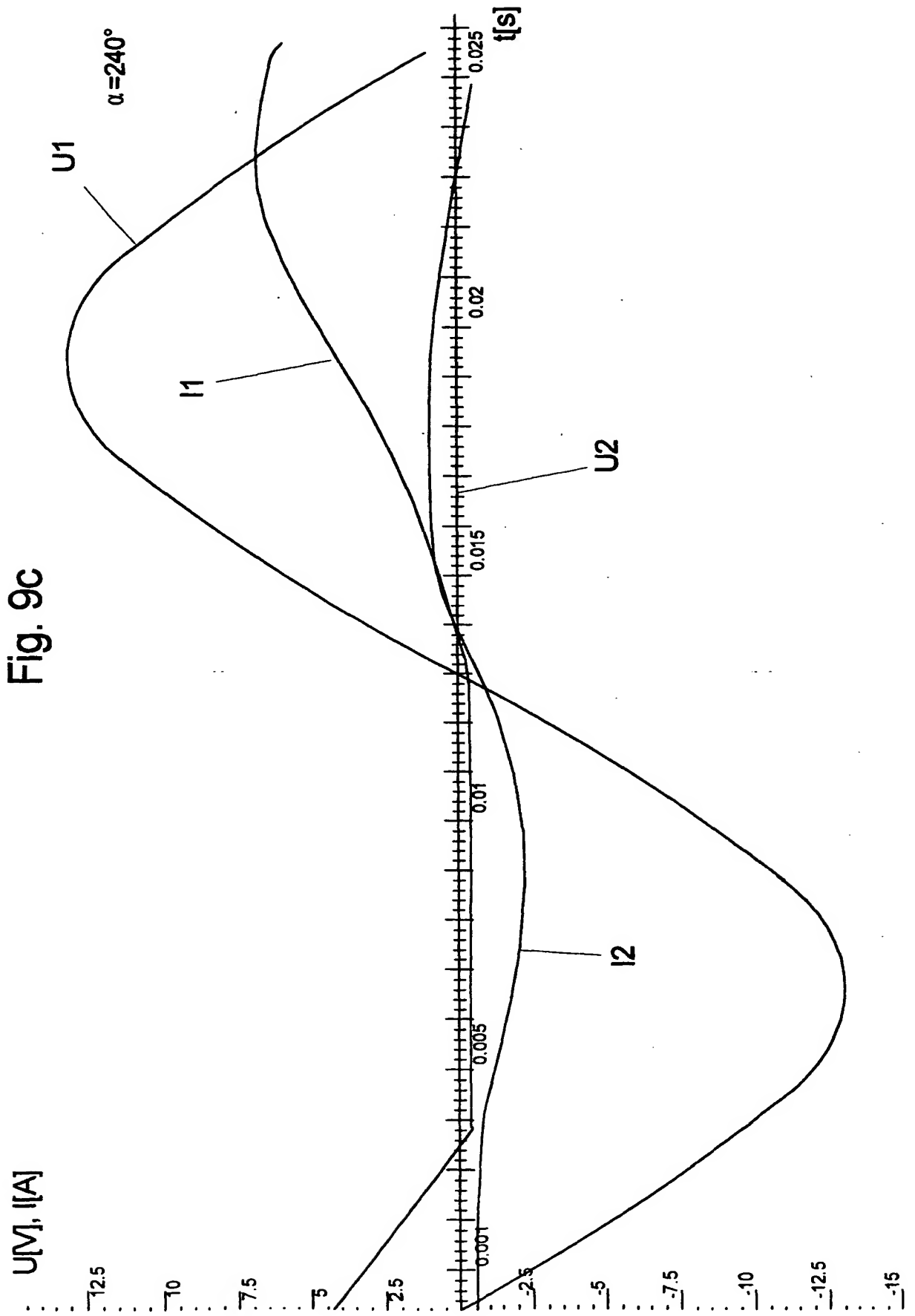
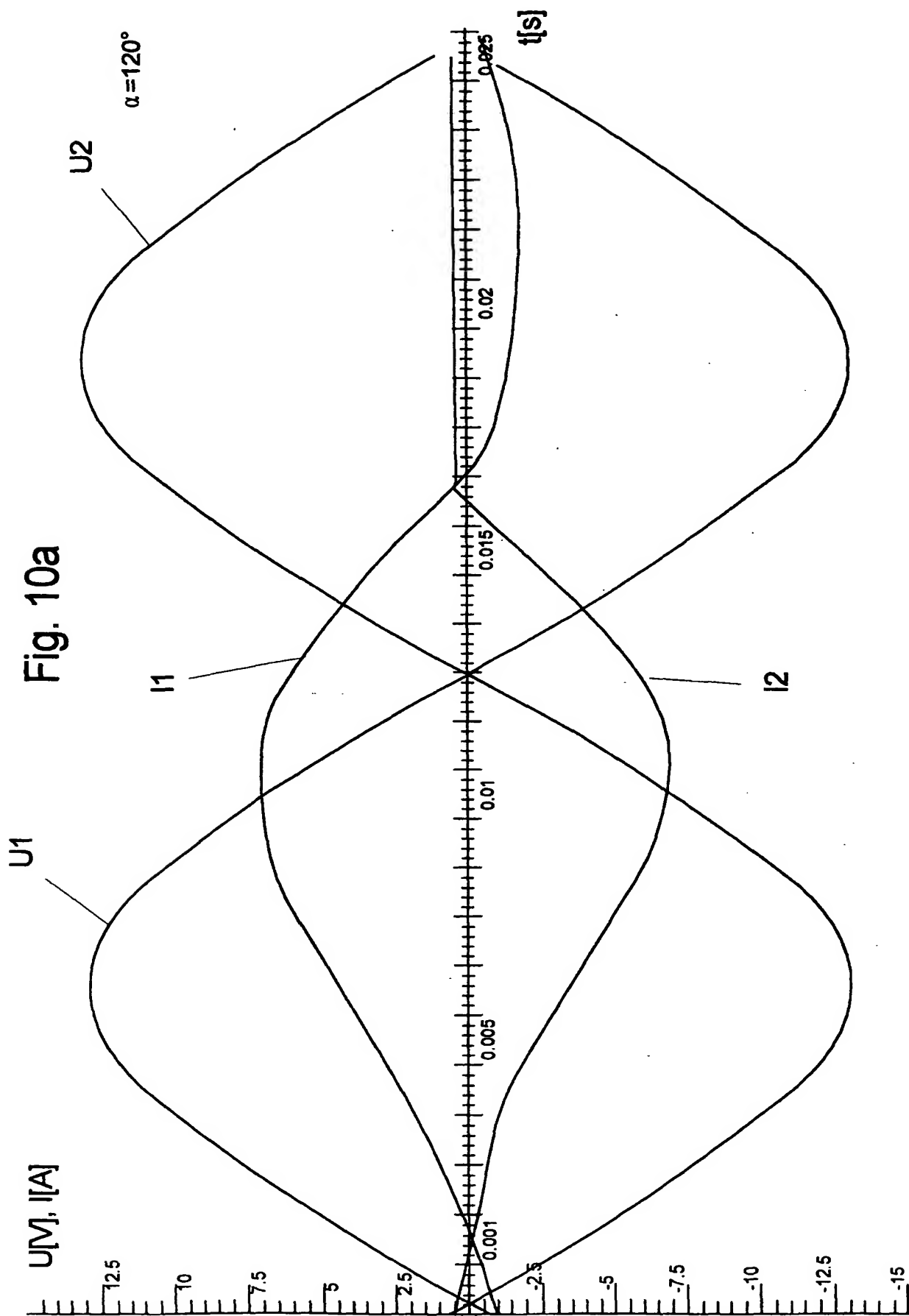
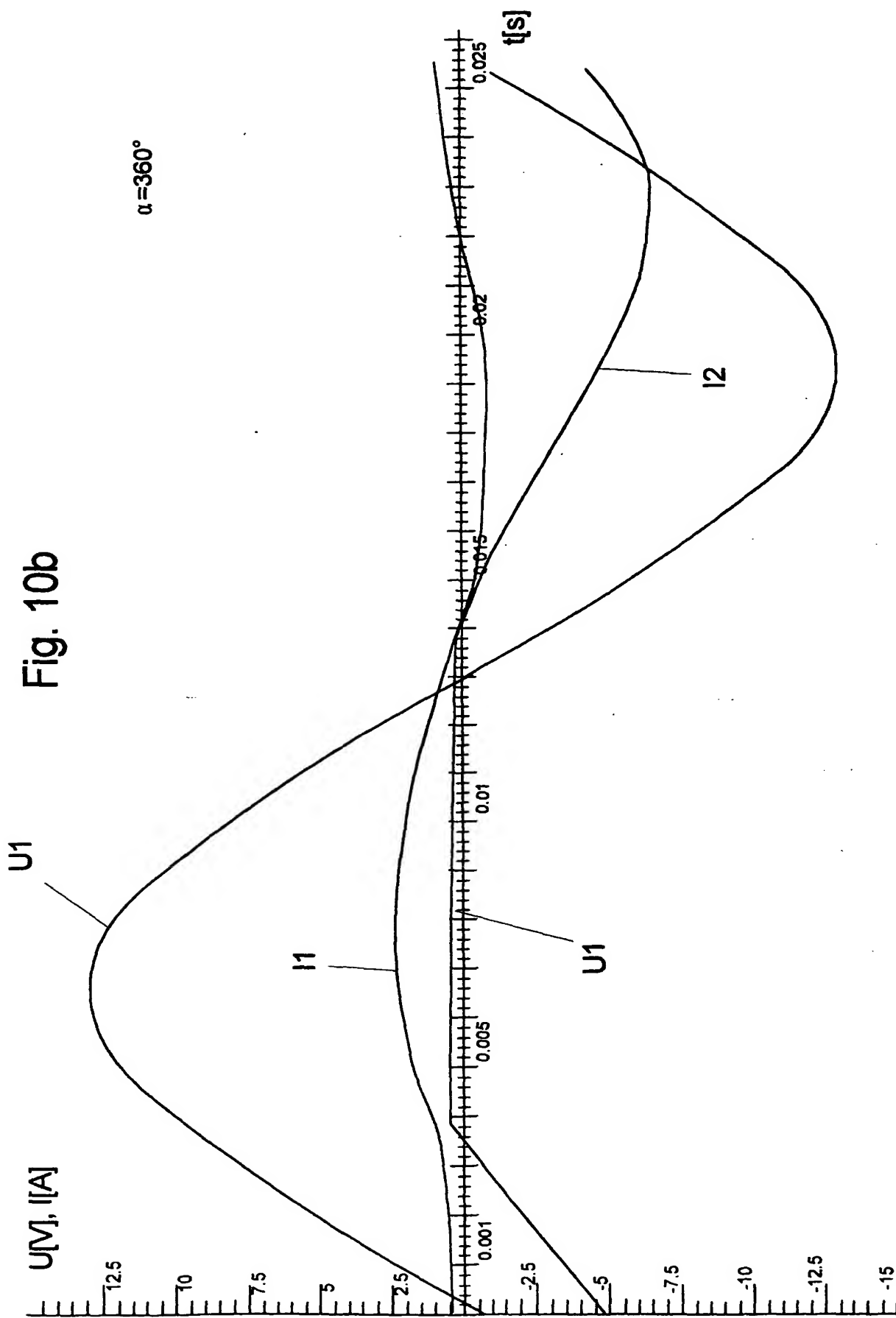


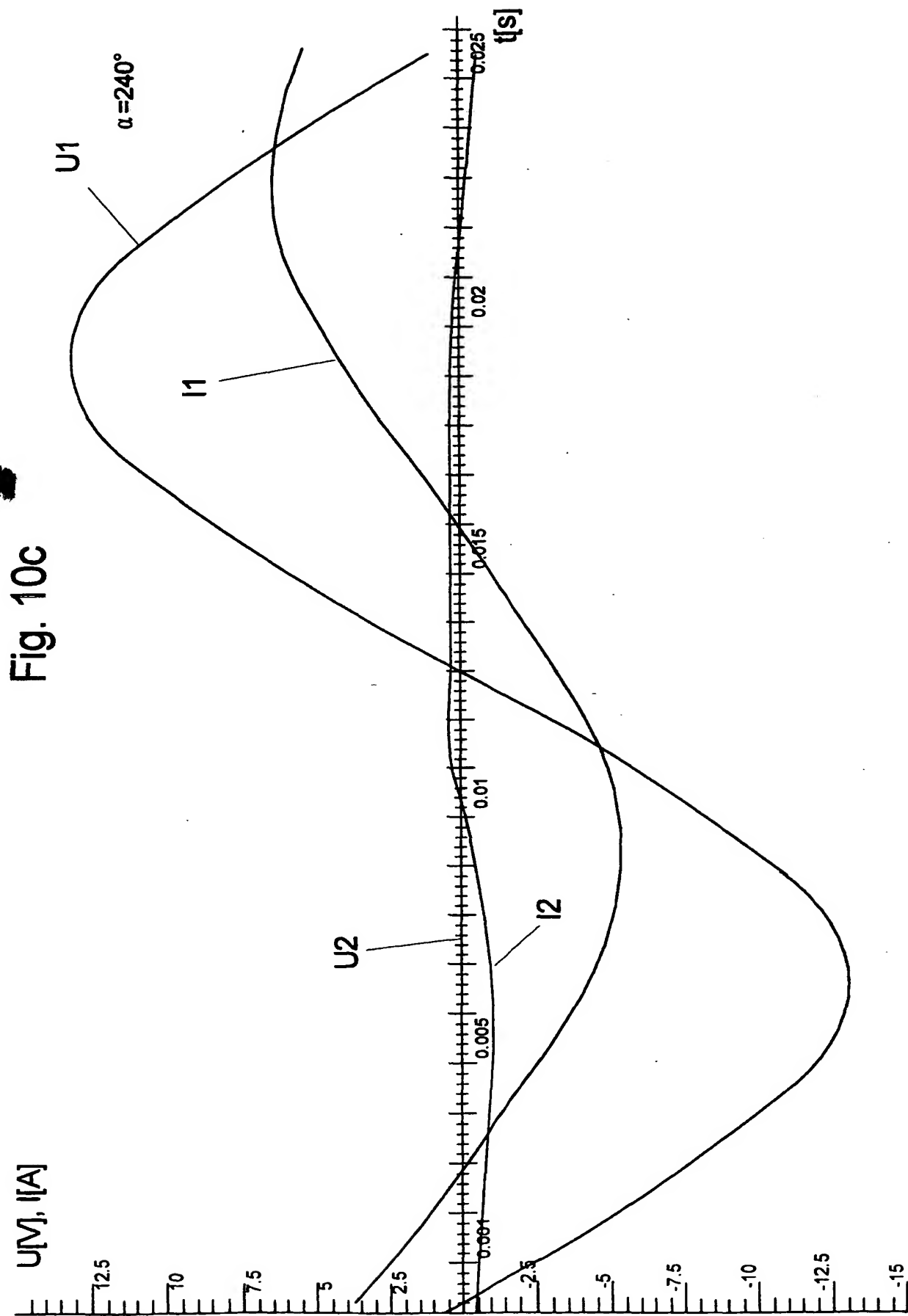
Fig. 9b

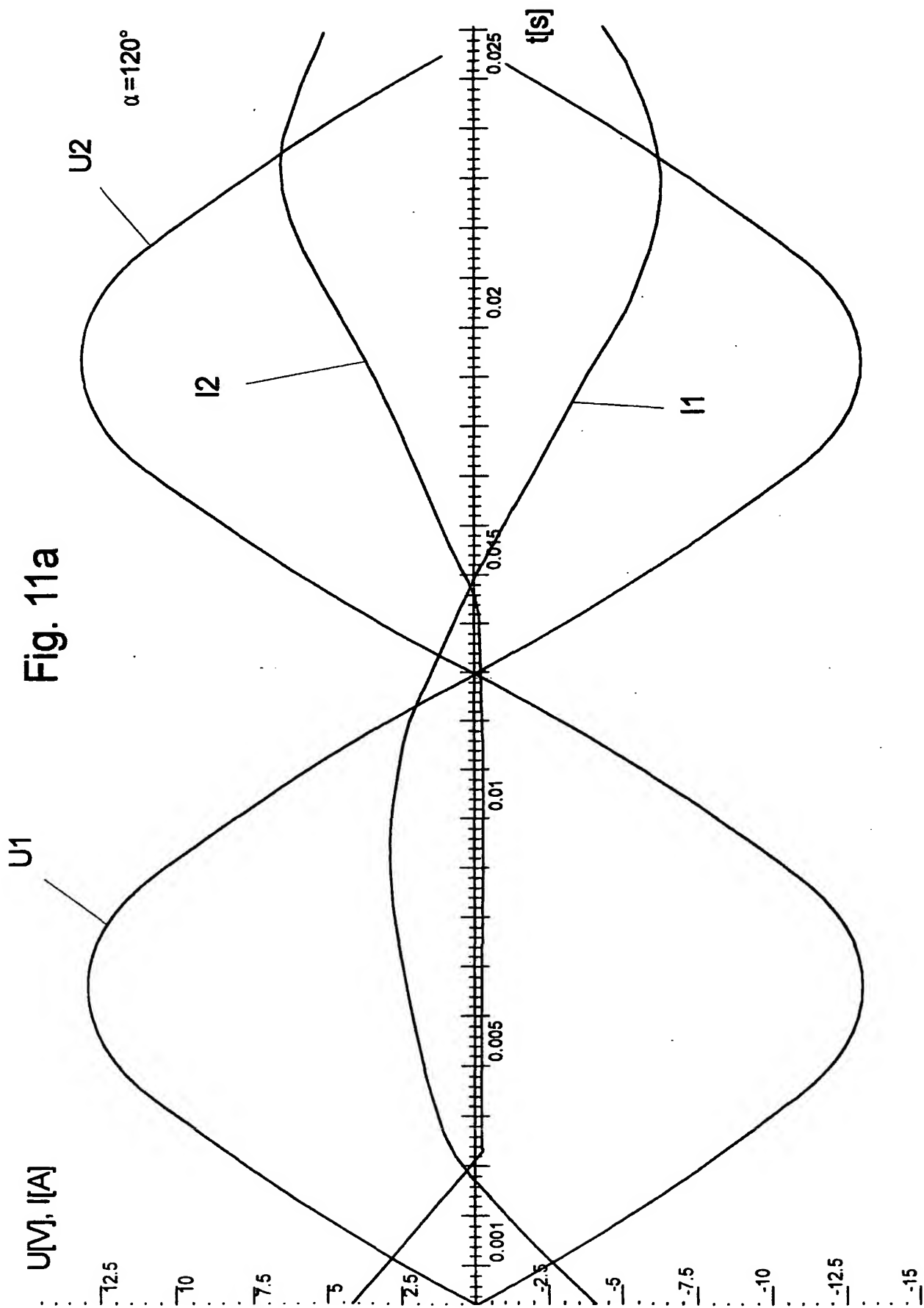












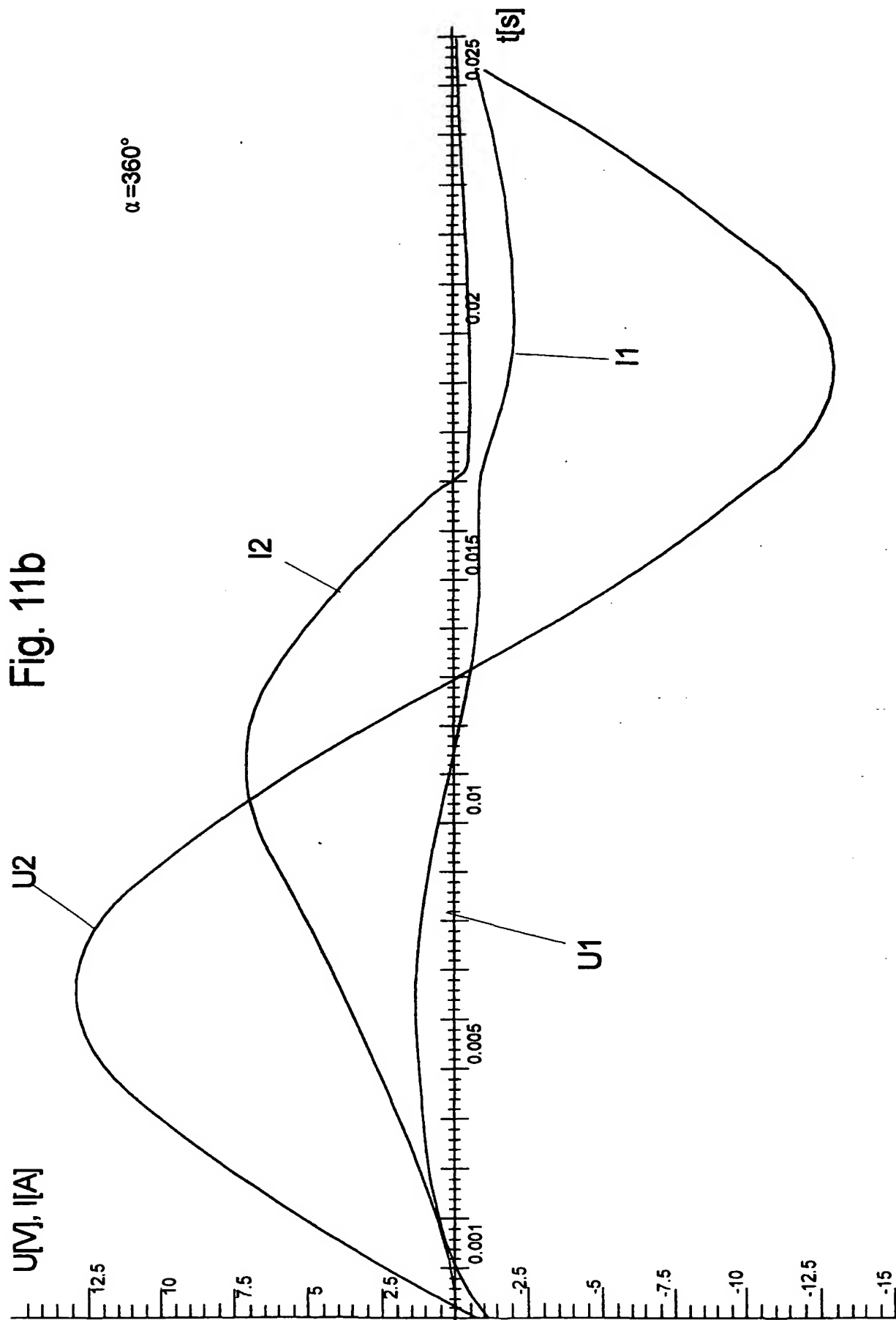
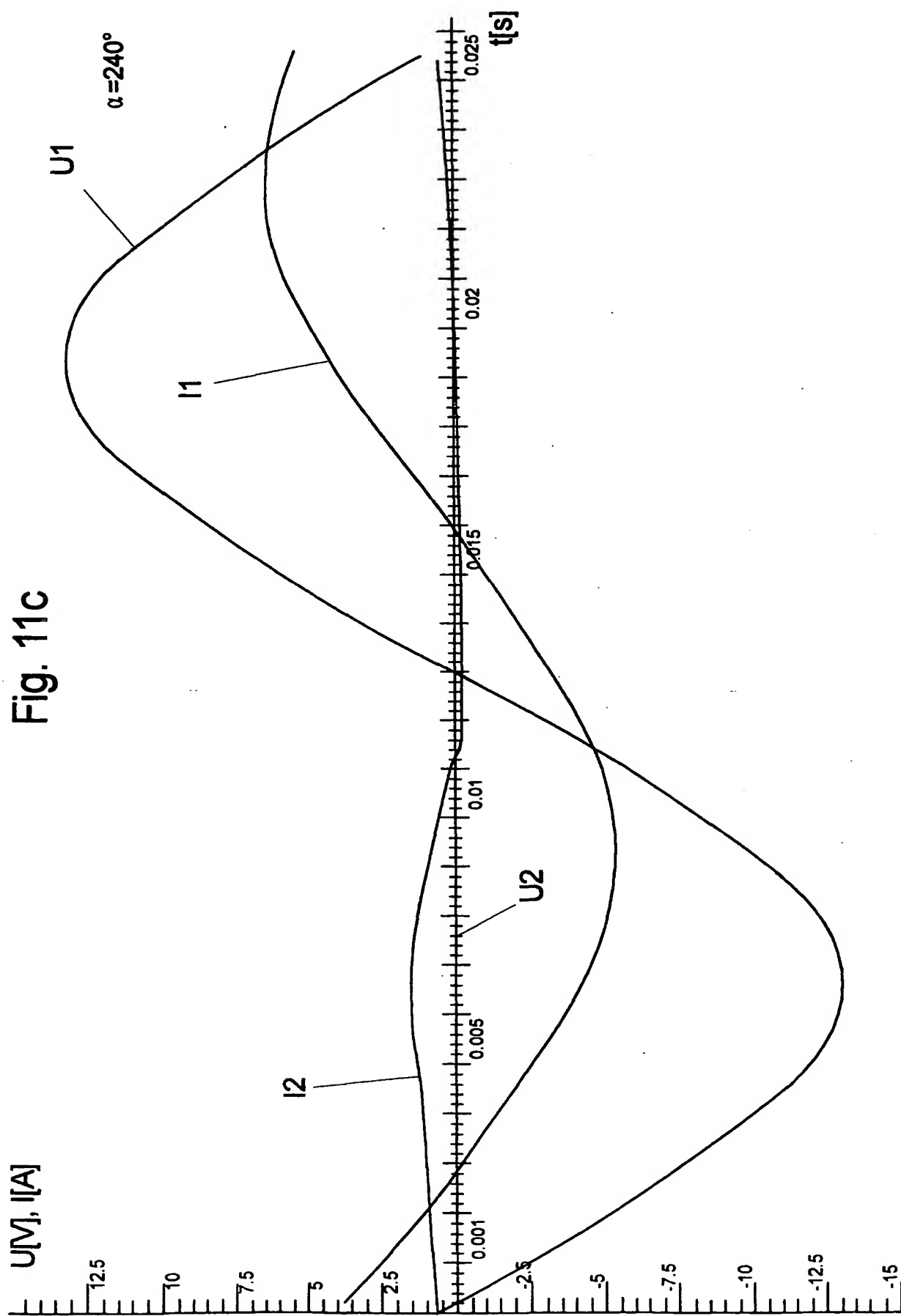
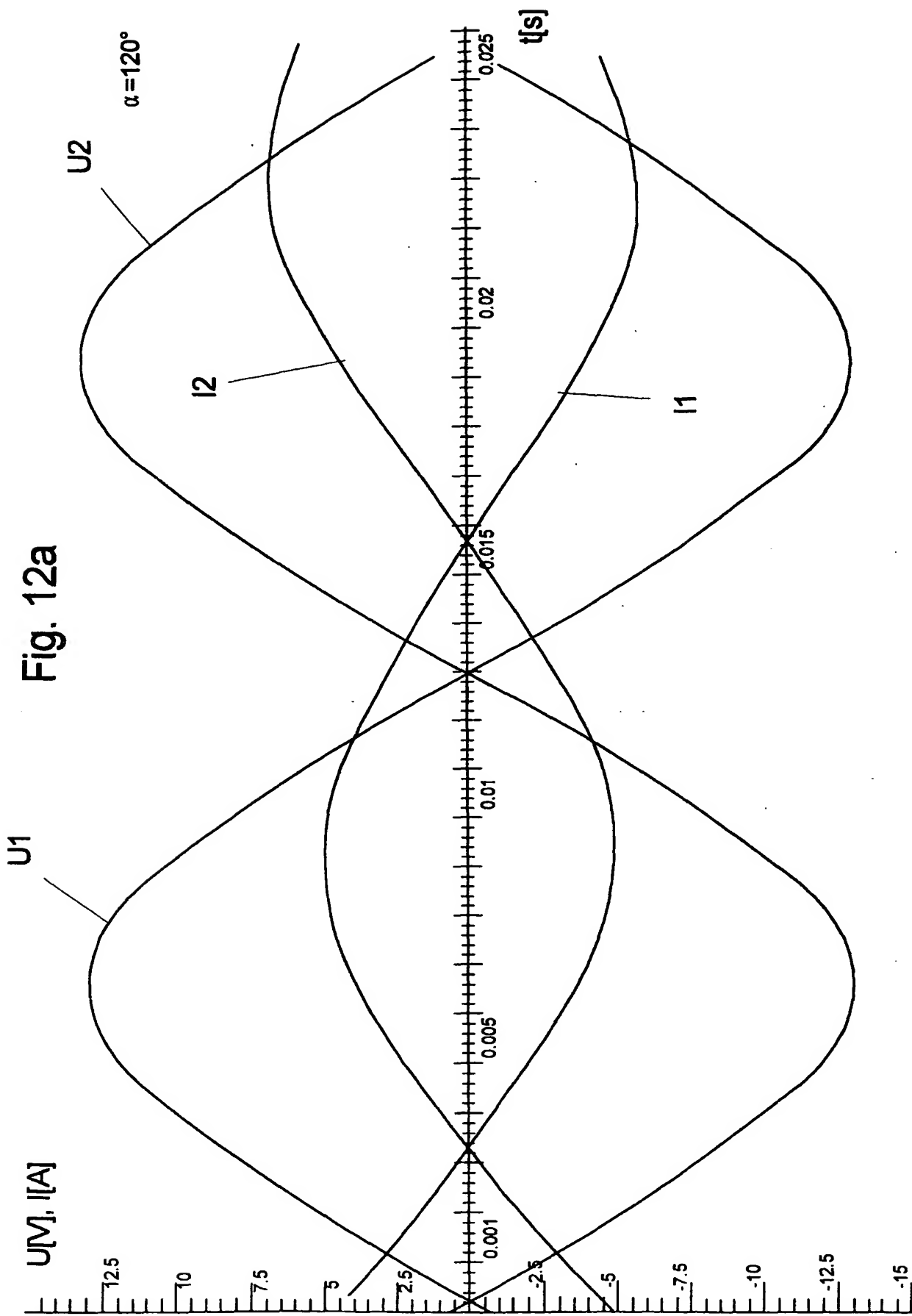
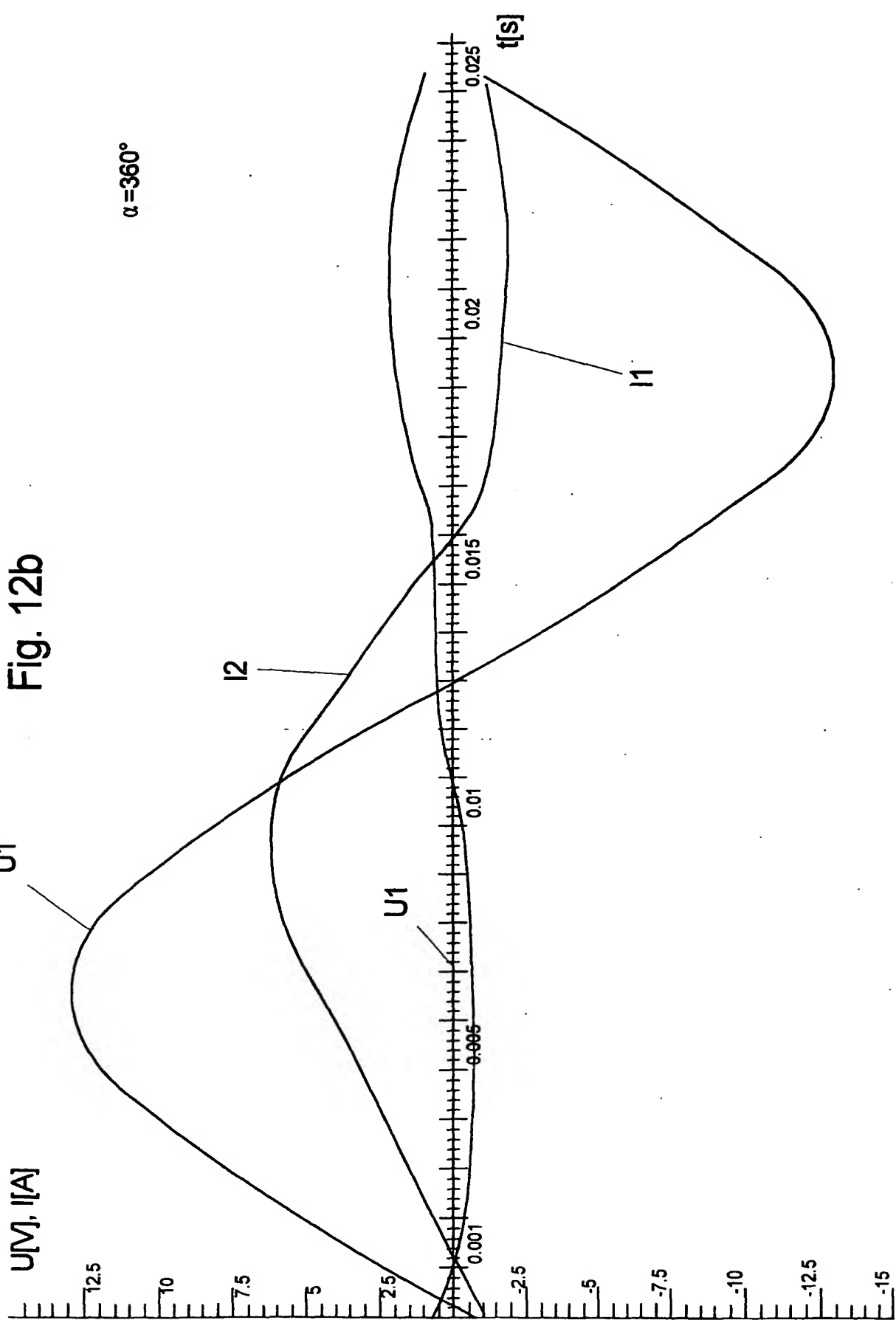
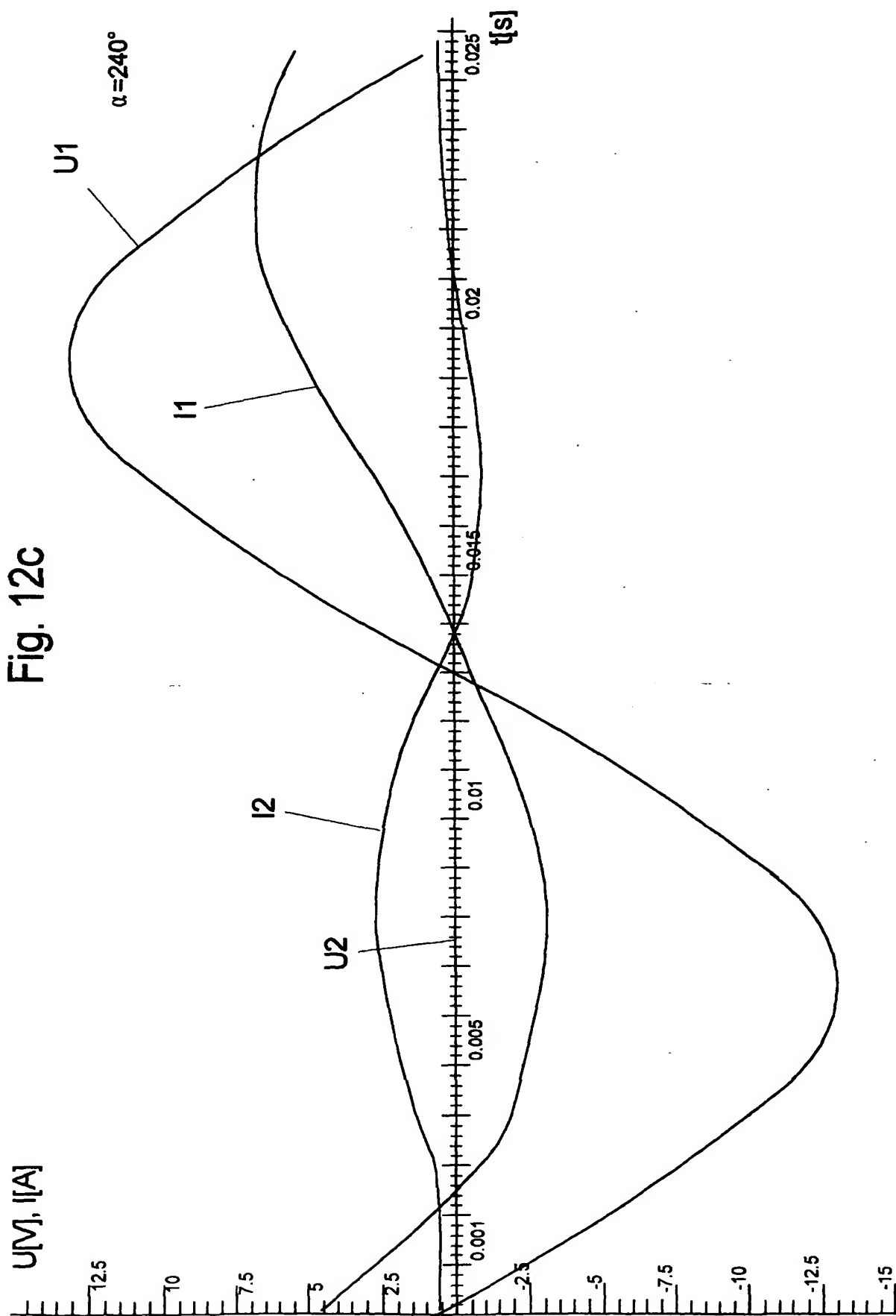


Fig. 11b











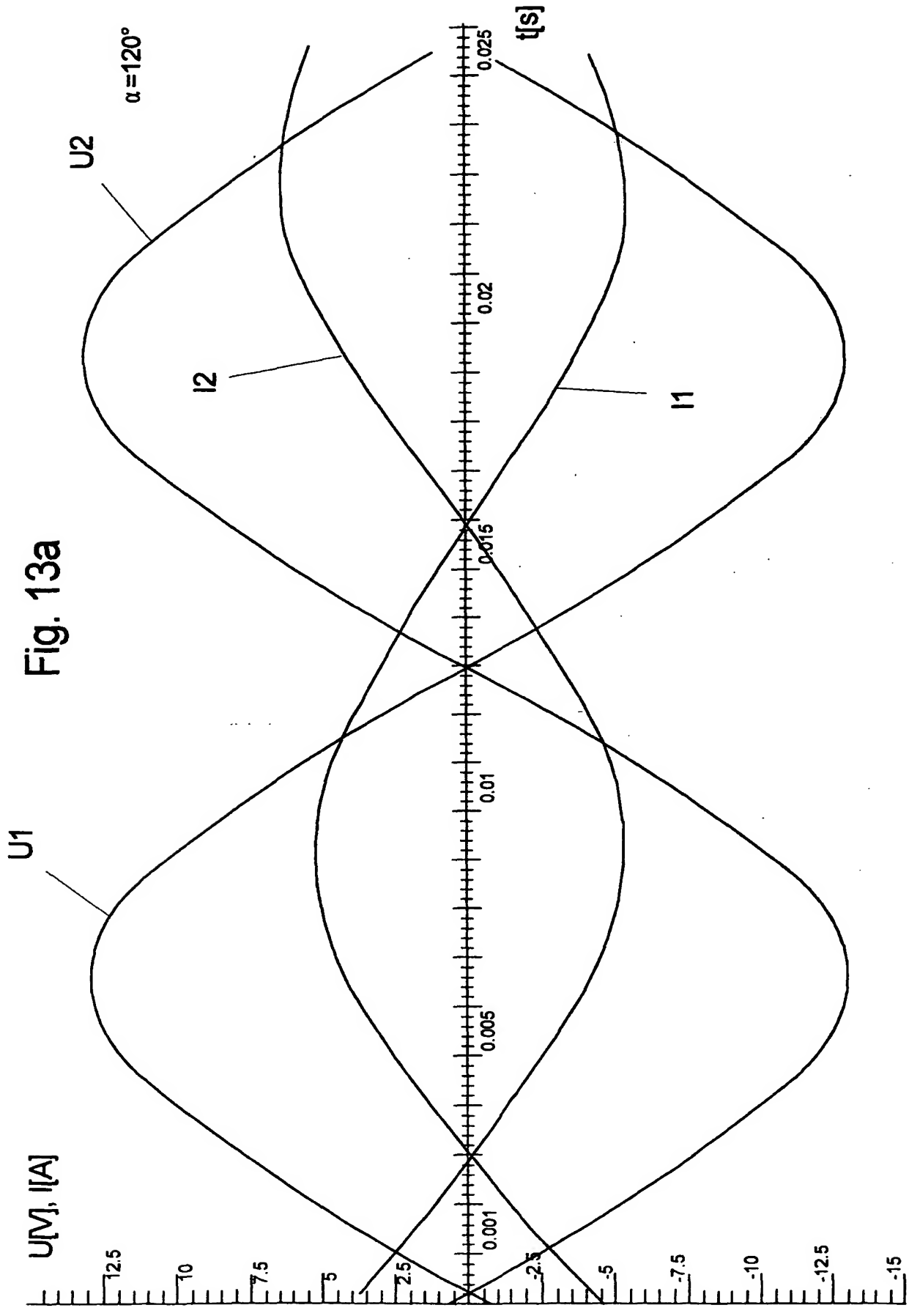


Fig. 13a

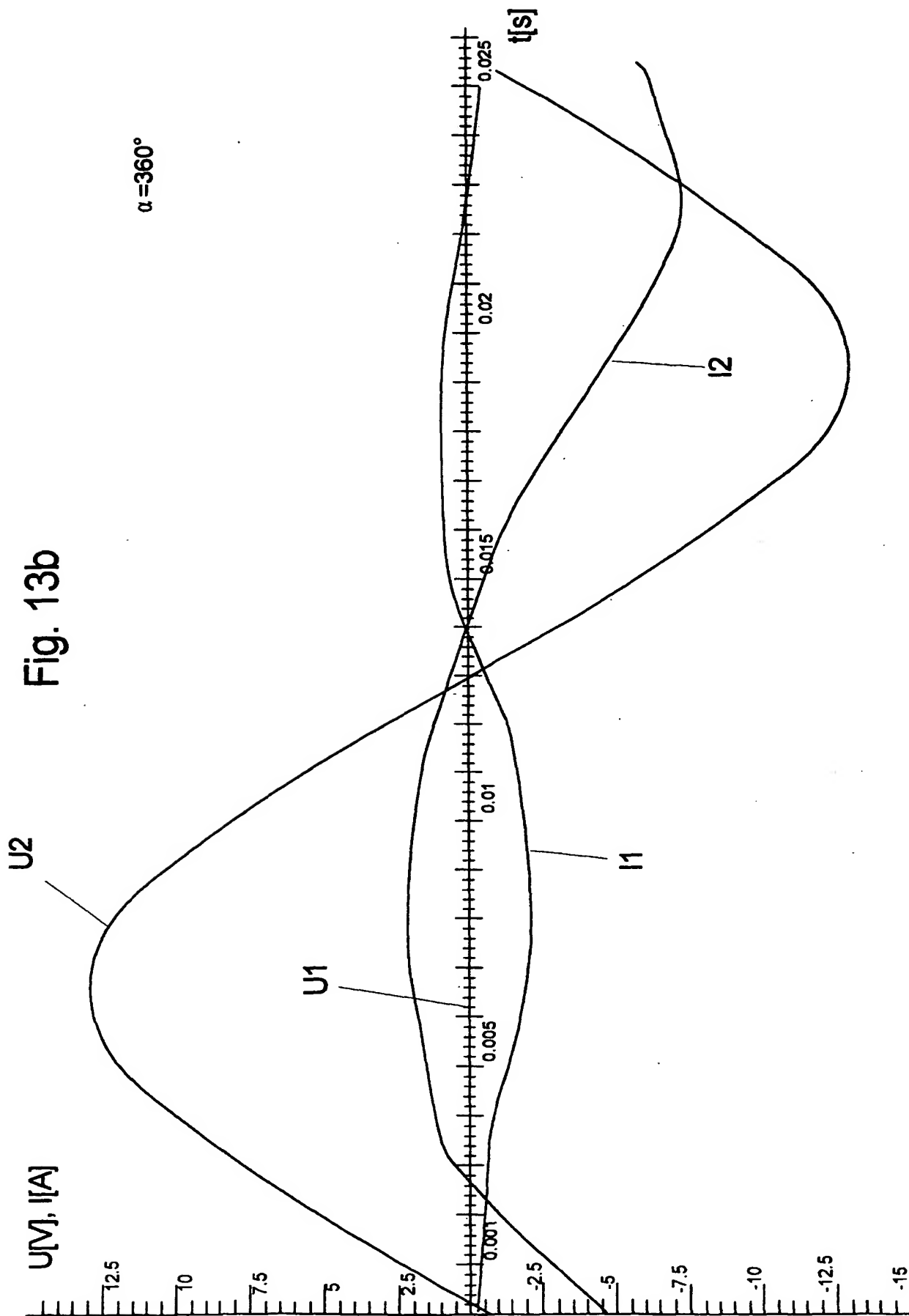
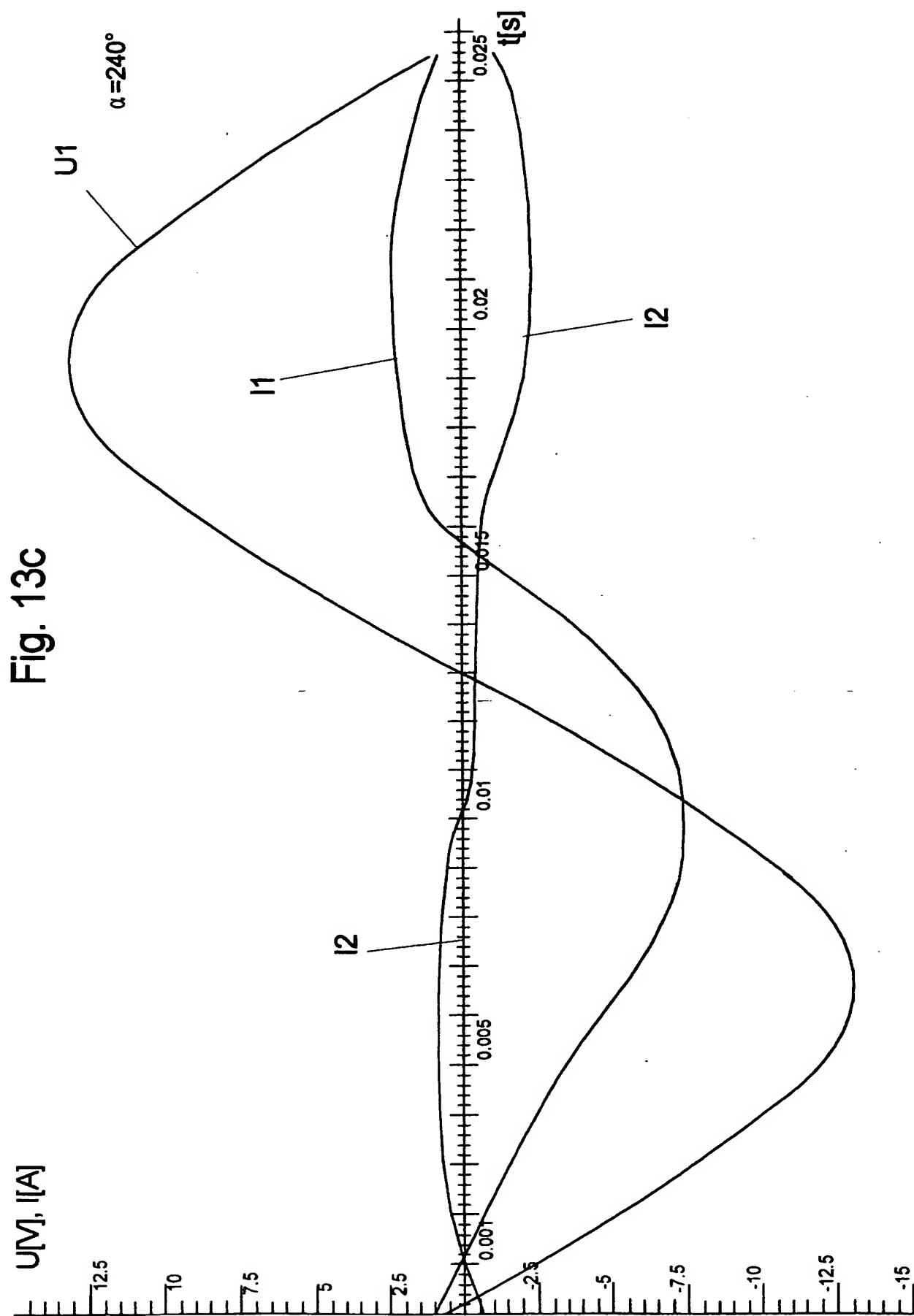
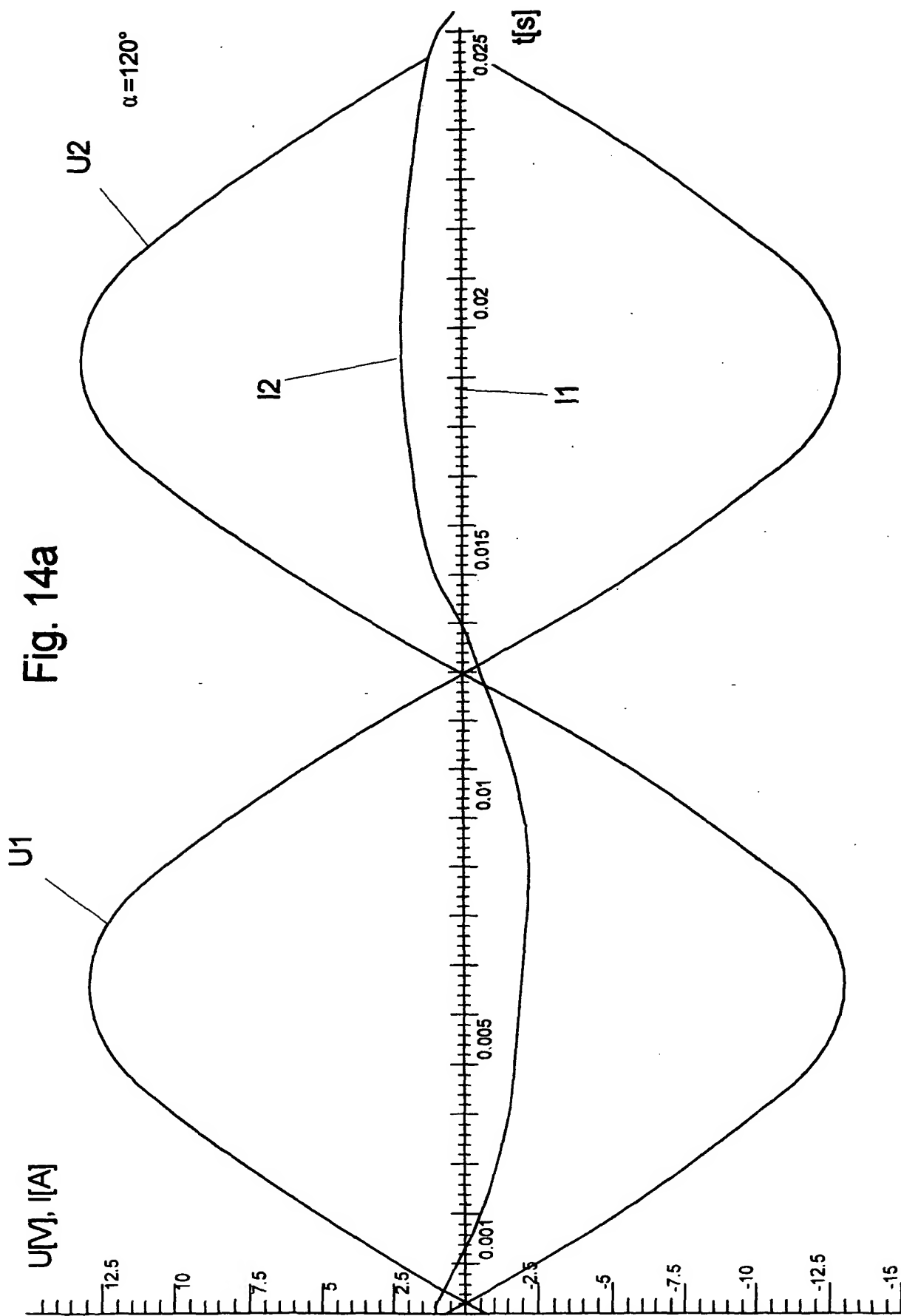


Fig. 13b





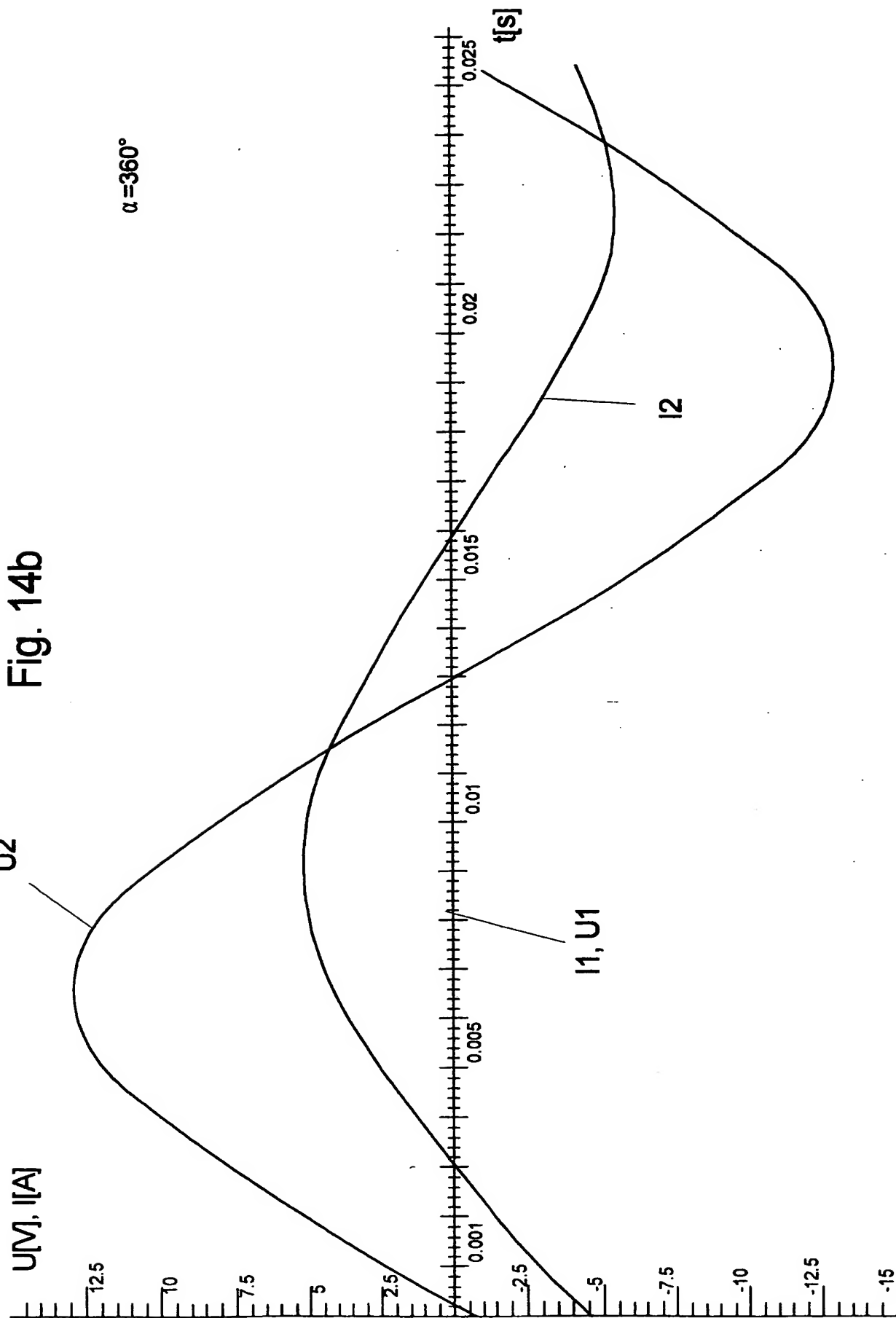
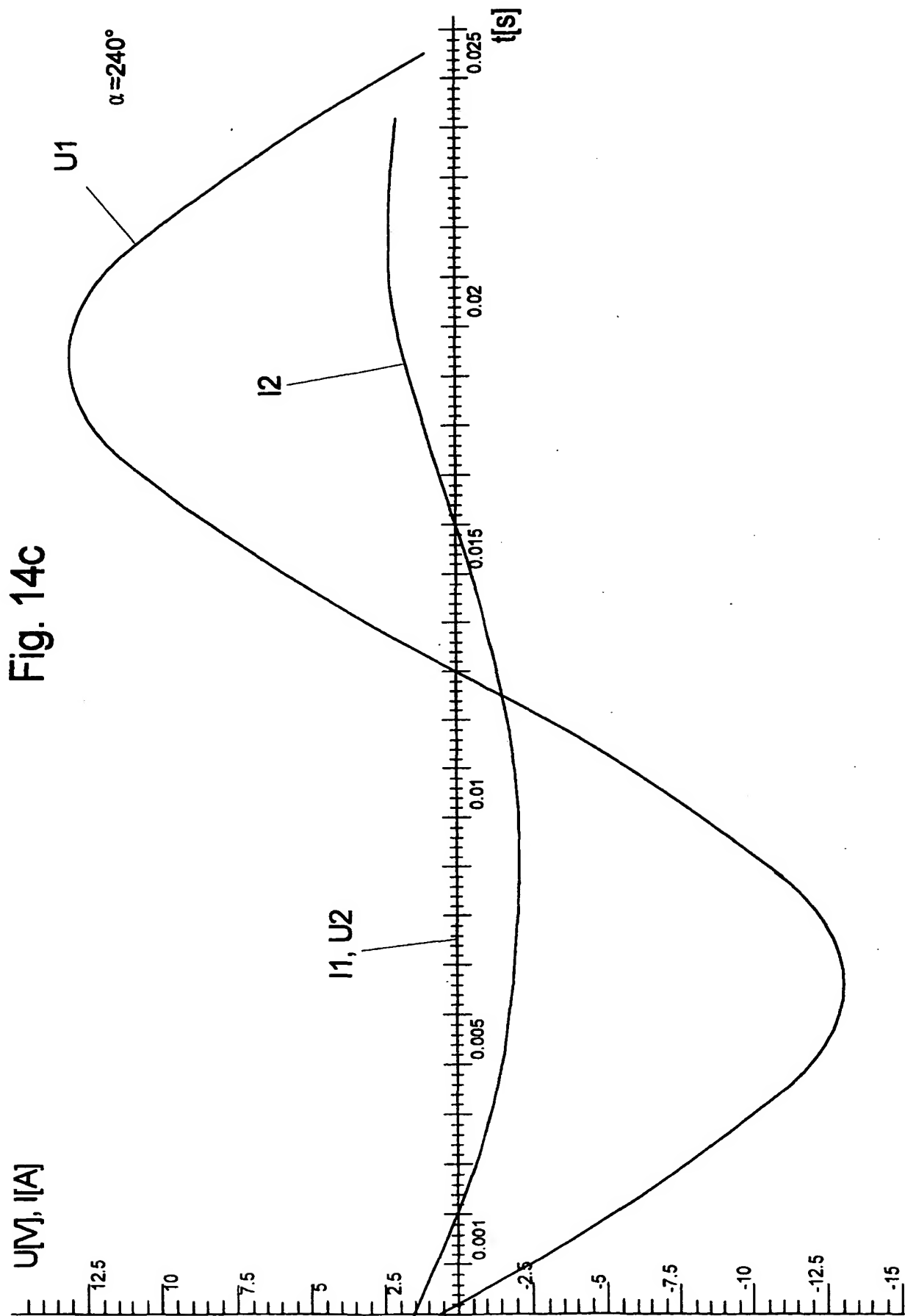
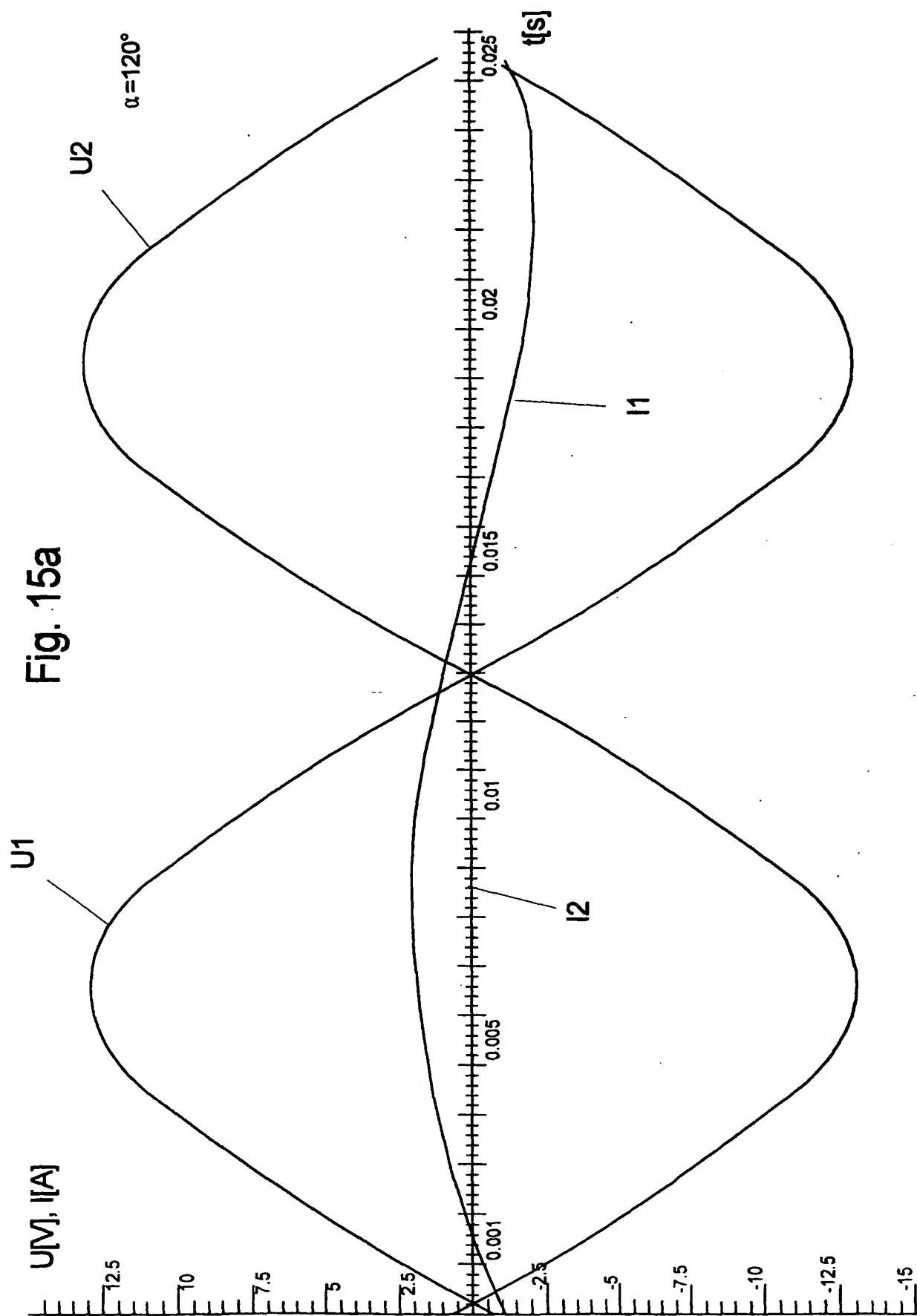


Fig. 14b





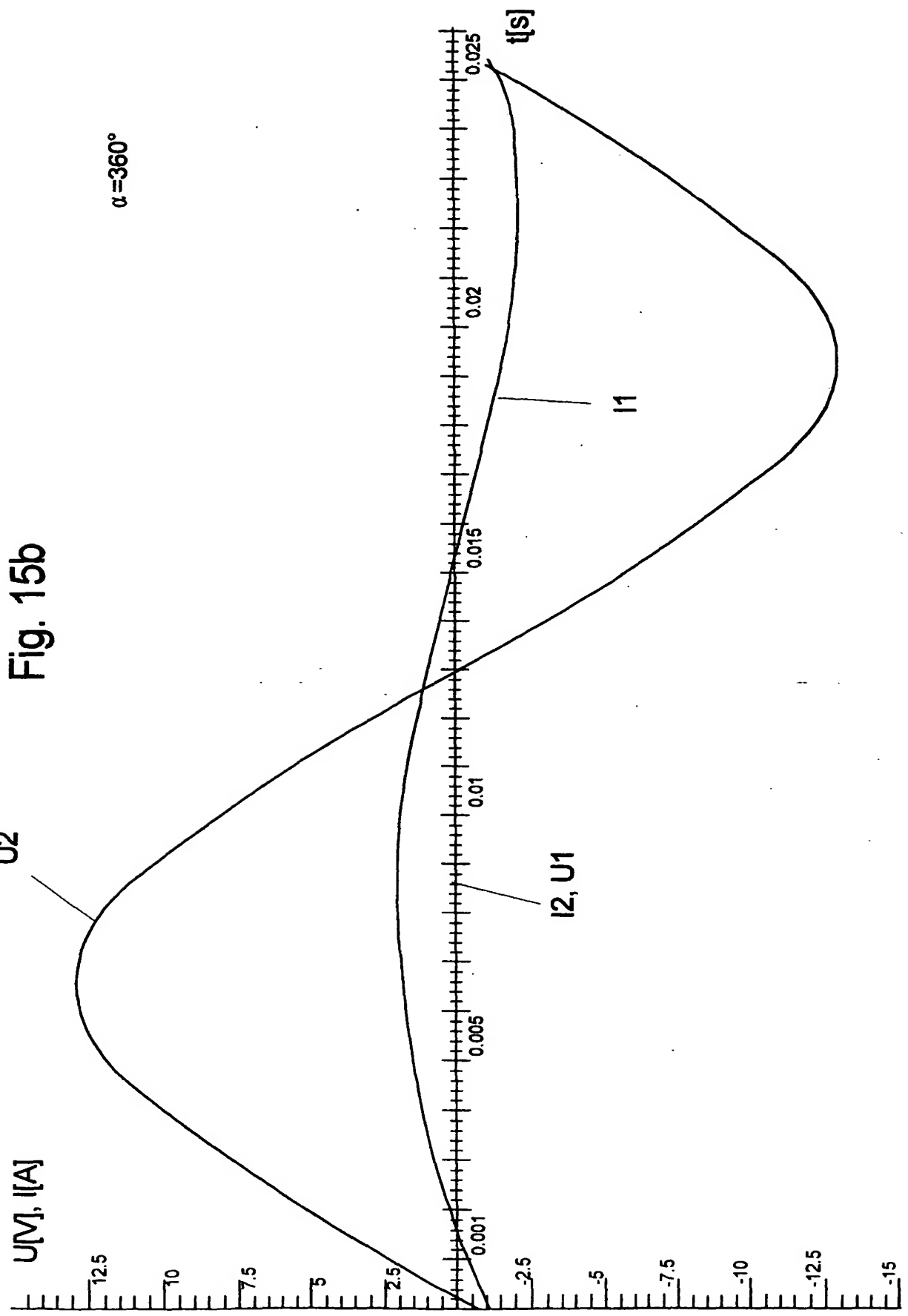
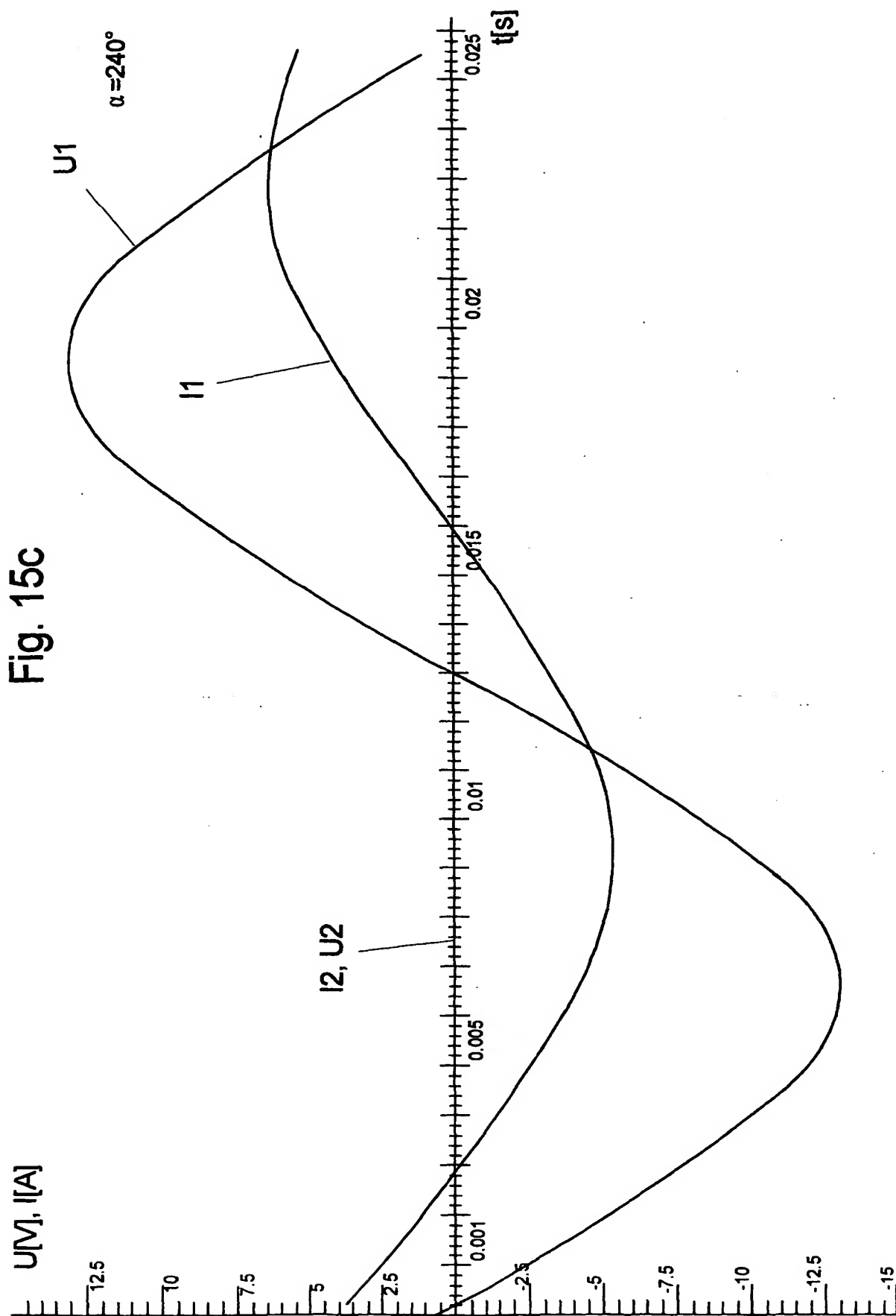
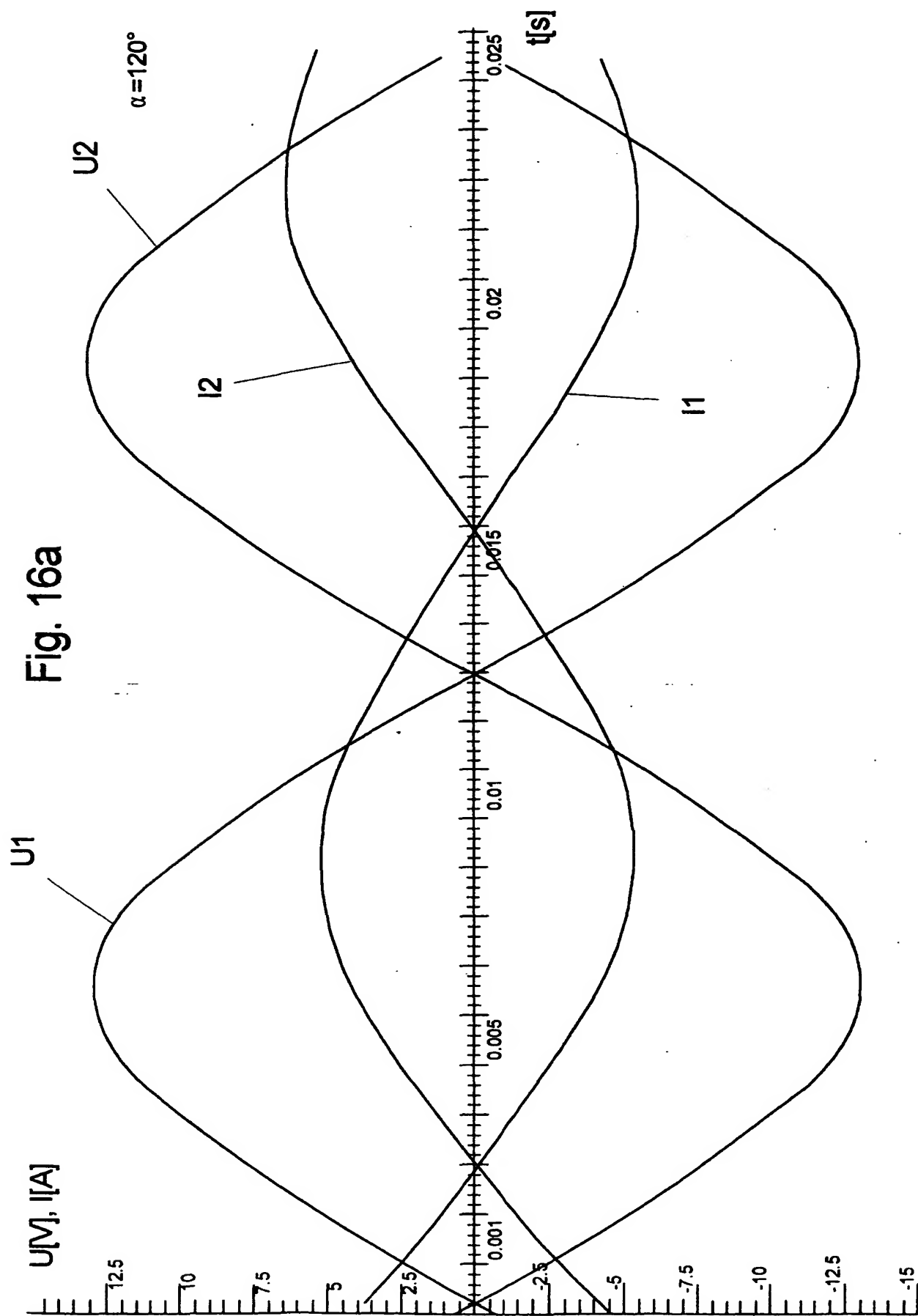
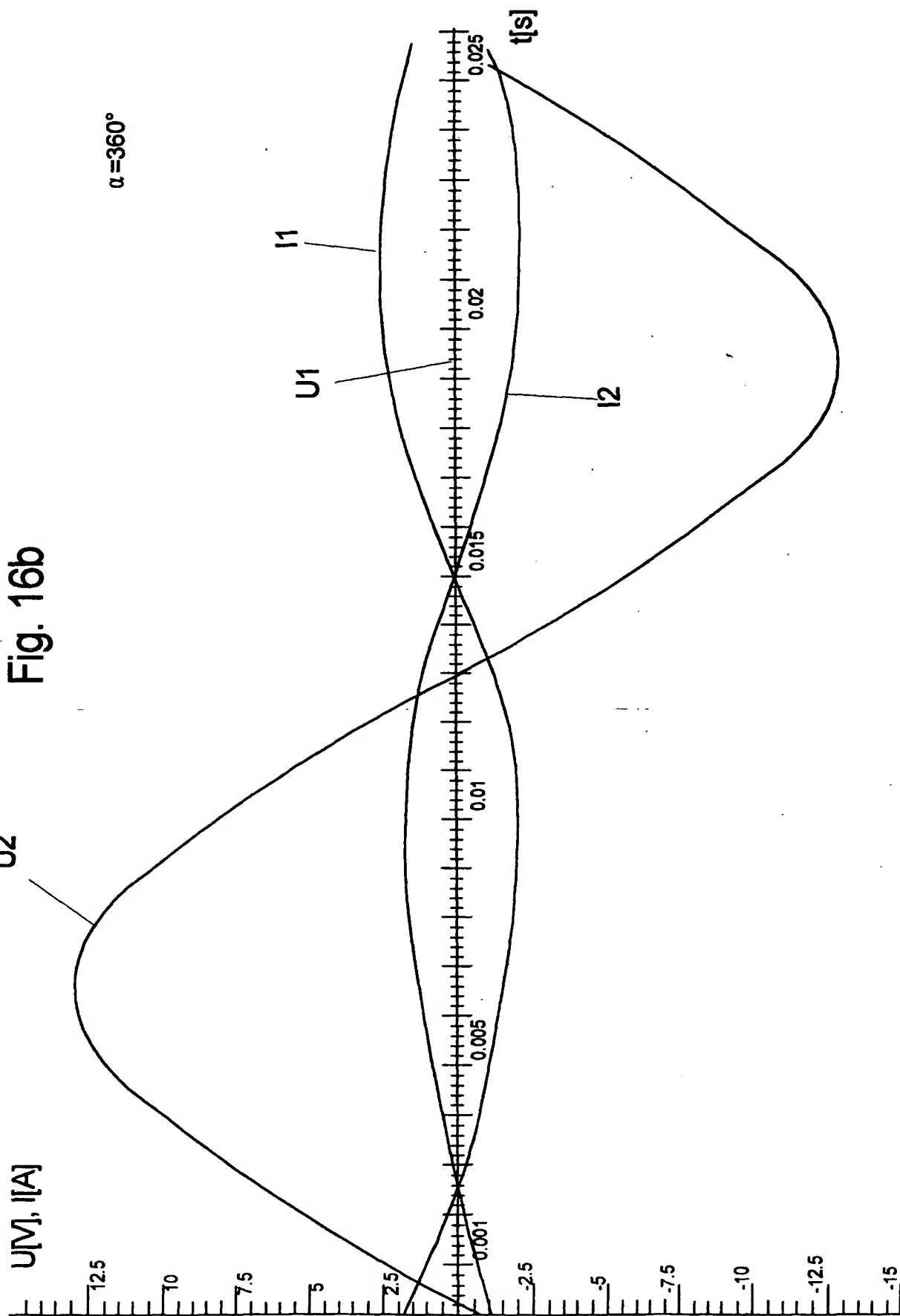


Fig. 15b









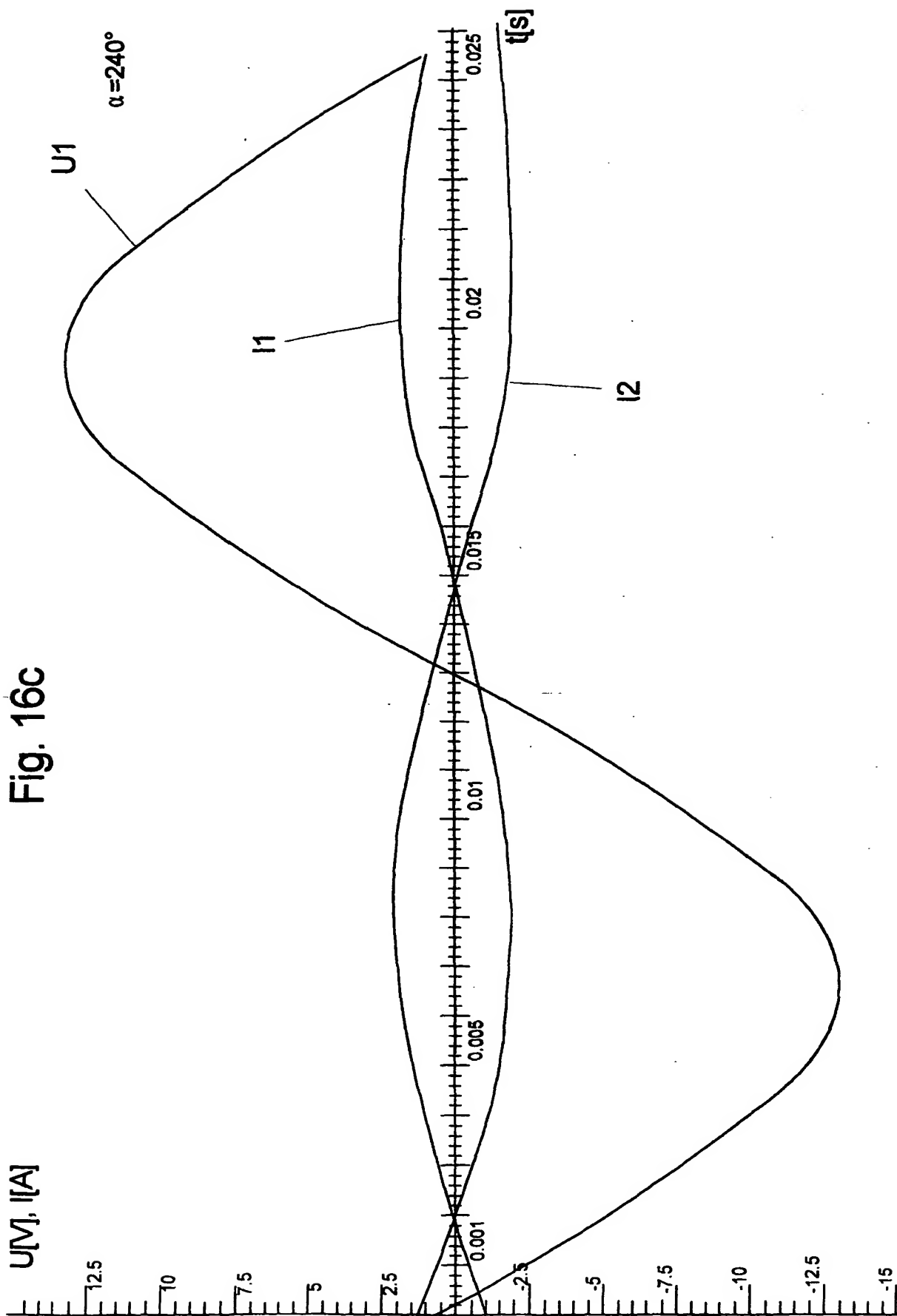


Fig. 17

	Messschritt 1	Messschritt 2	Messschritt 3	Ergebnis
U1	U	-U/2	-U/2	
U2	-U/2	U	-U/2	
U3	-U/2	-U/2	U	
-ERR	1	1	1	Kein Kurzschluss
	0	0	1	Kurzschluss Phase 11-12
	0	1	0	Kurzschluss Phase 11-13
	1	0	0	Kurzschluss Phase 12-13
	0	0	0	Test auf Erdschluss durchführen...

Fig. 18

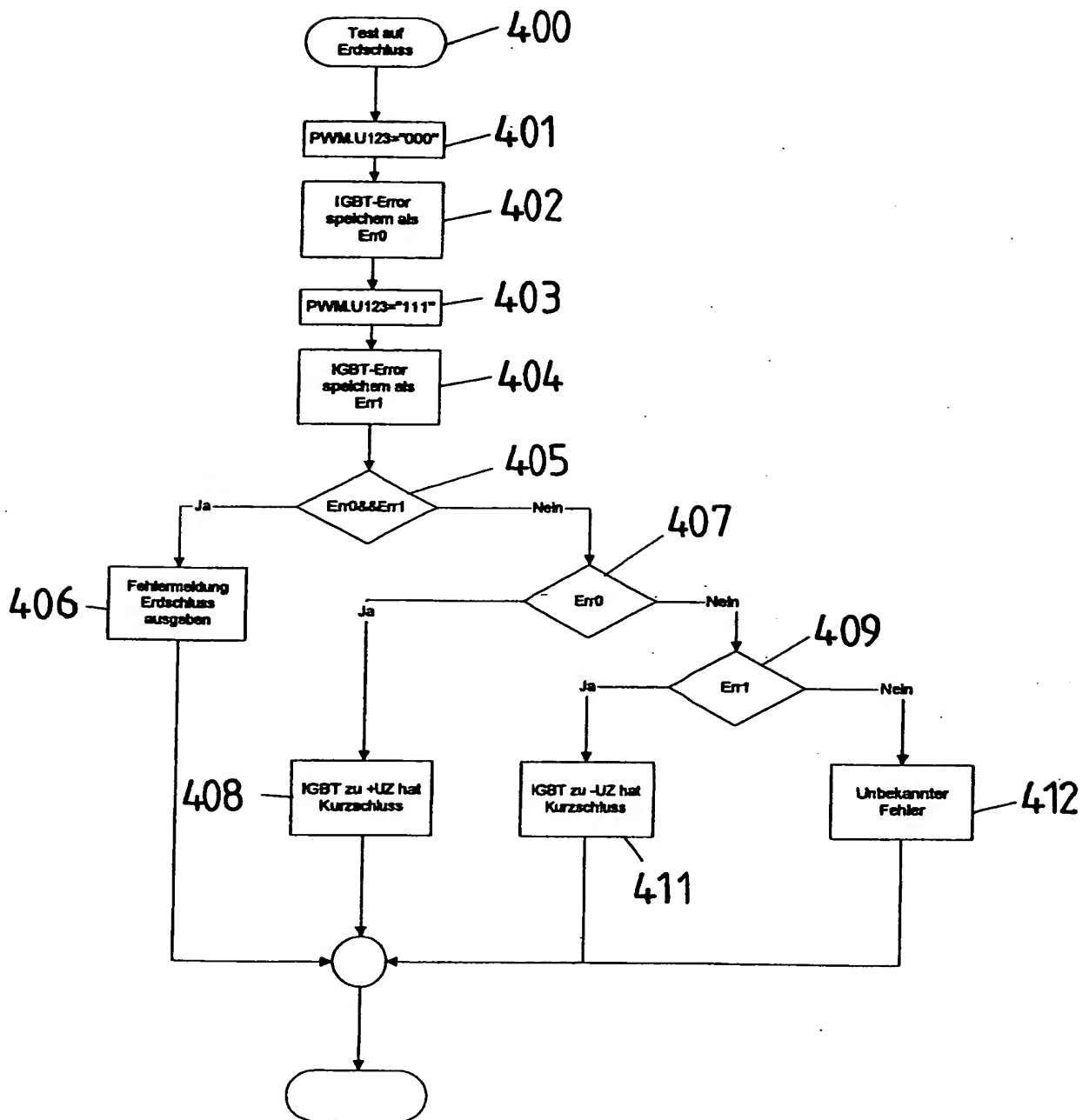


Fig.1

